



TESIS -RC142501

**PERILAKU HUBUNGAN BEBAN-*DISPLACEMENT*
KOLOM BETON PRACETAK MUTU TINGGI DENGAN
SAMBUNGAN BESI *GROUTED SLEEVE COUPLER*
MENGUNAKAN PROGRAM ABAQUS**

MUHAMMAD ALI ROFIQ
NRP. 03111750020014

DOSEN PEMBIMBING :
Data Iranata, ST.,MT.,Ph.D
Harun Alrasyid ST.,MT.,Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



TESIS -RC142501

**PERILAKU HUBUNGAN BEBAN-*DISPLACEMENT*
KOLOM BETON PRACETAK MUTU TINGGI
DENGAN SAMBUNGAN BESI *GROUTED SLEEVE*
COUPLER MENGGUNAKAN PROGRAM ABAQUS**

MUHAMMAD ALI ROFIQ
NRP. 03111750020014

DOSEN PEMBIMBING :
Data Iranata, ST.,MT.,Ph.D
Harun Alrasyid ST.,MT.,Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

“Halaman ini sengaja di kosongkan“

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
Muhammad Ali Rofiq
Nrp. 03111750020014

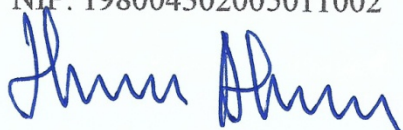
Tanggal Ujian : 9 Januari 2019
Periode Wisuda : Maret 2019

Disetujui Oleh :



1. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.
NIP: 198004302005011002

(Dosen Pembimbing I)



2. Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.
NIP: 198308082008121005

(Dosen Pembimbing II)



3. Budi Suswanto, ST., MT., Ph.D.
NIP: 197301281998021002

(Dosen Penguji I)

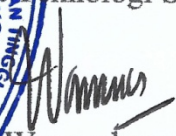


4. Bambang Pisceca, ST., MT., Ph.D.
NIP: 198403182008121002

(Dosen Penguji II)



Dekan Fakultas Teknik Sipil Lingkungan Dan Kebumihan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Warmadewanthi, ST., MT., Ph.D.
NIP: 1950212 199903 2001

“Halaman ini sengaja di kosongkan“

PERILAKU HUBUNGAN BEBAN-*DISPLACEMENT* KOLOM BETON PRACETAK MUTU TINGGI DENGAN SAMBUNGAN BESI *GROUTED SLEEVE COUPLER* MENGGUNAKAN PROGRAM ABAQUS

Nama Mahasiswa : Muhammad Ali Rofiq

NRP : 03111750020014

Dosen Pembimbing : 1. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.
2. Harun Al Rasyid, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Beton pracetak menjadi solusi untuk menangani permasalahan kecepatan konstruksi pada struktur beton bertulang gedung tinggi. Penerapan material mutu tinggi mulai digunakan untuk membatasi luas kolom dilantai bawah struktur gedung tinggi. Struktur beton pracetak mempunyai kelemahan pada sambungannya. Terdapat dua spesimen kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan *grouted sleeve coupler* dimensi 600x600x1800 mm yang akan dimodelkan menggunakan program bantu ABAQUS dengan beban aksial secara konstan dan *lateral displacement*. Spesifikasi tulangan longitudinal mutu tinggi (SD685) dan tulangan transversal mutu tinggi (SD785) digunakan pada penelitian ini. Input beban aksial yang digunakan adalah $0,1A_gf'_c$ dan $0,33A_gf'_c$ dengan beban *lateral displacement* sampai gagal. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku hubungan *applied load* terhadap *drift* kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan *grouted sleeve coupler* ditinjau dari hasil hubungan *applied load* dan berapa persen *drift* yang terjadi akibat beban *lateral displacement*. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa prediksi FEA kolom beton pracetak mempunyai korelasi yang baik dengan hasil eksperimen sampai pada fase non linier (setelah elastis) pada drift 3,055%. Hasil FEA pada kolom pracetak juga menunjukkan korelasi yang baik dengan hasil FEA kolom monolit.

Kata Kunci : Kolom pracetak, *grouted sleeve coupler*, beton mutu tinggi, *drift*

“Halaman ini sengaja di kosongkan“

PRECAST HIGH-STRENGTH REINFORCED CONCRETE COLUMNS DISPLACEMENT-LOAD RELATIONSHIP BEHAVIOR WITH GROUTED SLEEVE COUPLER BAR SPLICE USING ABAQUS PROGRAM

Name : Muhammad Ali Rofiq

Student ID : 03111750020014

Advisor : 1. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.

2. Harun Al Rasyid, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Precast concrete becomes the solution to handle the problem of construction speed in high-rise reinforced concrete structure. The application of high-strength materials began to be used to limit the area of the lower floor columns of tall building structures. The precast concrete structure has a weakness in the joint. There are two precast high-strength reinforced concrete column specimens with a 600x600x1800 mm dimension grouted sleeve coupler that will be modeled using ABAQUS program under constant axial and lateral displacement load. Specifications of high-strength longitudinal bars (SD685) and high-strength transverse reinforcement (SD785) were used in this study. The axial load used are $0.1A_gf'_c$ dan $0.33A_gf'_c$ under lateral displacement loads until failure. The purpose of this study is to know applied load and drift relationship behavior of precast high-strength reinforced concrete columns with grouted sleeve coupler splice in terms of the relationship of applied load and what percentage drift occurs due to lateral displacement load. The modeling results show that the FEA prediction of precast concrete columns has a good correlation with the experimental results up to the non linear (after elastic) phase at 3.055% drift. The FEA results in the precast column also showed good correlation with the results of the FEA monolithic column.

Key Words : Precast column, grouted sleeve coupler, high-strength concrete, drift

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT, karena atas berkah dan limpahan rahmatnya lah penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Tesis ini adalah sebagai salah satu persyaratan yang harus dikerjakan oleh setiap mahasiswa Pascasarjana Teknik Sipil ITS untuk menyelesaikan masa studi tingkat magisternya (S-2), tesis ini sudah diseminarkan dalam ujian tesis yang telah dilaksanakan pada 9 januari 2019.

Penulis menyadari bahwa dalam tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu sangat diharapkan kritik atau saran yang bersifat membangun demi semakin sempurnanya tesis ini.

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Data Iranata, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing akademik.
2. Data Iranata, ST., MT., Ph.D dan Harun Alrasyid, ST, MT, Ph.D selaku dosen pembimbing tesis yang telah berkenan meluangkan waktu untuk asisntensi pada tesis ini.
3. Ayah dan Ibu yang telah memberikan dukungan untuk saya dalam menyelesaikan tesis ini.
4. Semua rekan S-2 angkatan 2017 Teknik Sipil FTSLK-ITS yang telah menemani mulai awal hingga akhirnya perkuliahan ini.

Surabaya, januari 2019

Penulis

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Ruang Lingkup.....	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Pendahuluan	7
2.2. Umum.....	7
2.3. Beton Pracetak Menggunakan Sambungan.....	7
2.3.1. Beton Pracetak Menggunakan Sambungan Kering	7
2.3.2. Kolom Beton Pracetak Menggunakan Sambungan <i>Sleeves</i>	12
2.4. Experimental ProgramSebelumnya.....	15
2.5. Pemodelan Numerik Dan Experimental Program Kolom Beton Pracetak Sambungan <i>Grouted Coupler</i>	20
2.6. <i>Constitutive material equation</i>	24
2.7. Concrete damage plasticity	26
2.8. Pemodelan Numerik Menggunakan Software <i>Finite Element</i>	28
BAB 3 METODOLOGI.....	31
3.1. Diagram Alir	31
3.2. Persiapan Data.....	32
3.3. Tinjauan Pustaka	33
3.4. Preliminary Design.....	33

3.5. Pemodelan Kolom Beton Pracetak Mutu Tinggi Sambungan Grouted Sleeve Coupler dengan Program ABAQUS.....	41
3.6. Analisa Hasil Pemodelan.....	56
3.7. Validasi Hasil	56
3.8. Kesimpulan.....	57
BAB 4 HASIL DAN ANALISA	59
4.1. Umum	59
4.2. Material.....	59
4.3. Pemodelan Kolom	63
4.4. Pembebanan dan Perletakan	64
4.5. Studi Input Parameter Tekan Beton.....	65
4.6. Studi Input Parameter Tarik Beton.....	70
4.7. Studi Input Parameter Tarik Tulangan	74
4.8. Hubungan Force-Displacement	76
4.8.1. Hasil Spesimen C10	76
4.8.2. Hasil Spesimen G10.....	79
4.8.3. Hasil Spesimen C33	83
4.8.4. Hasil Spesimen G33.....	84
4.9. Tegangan Pada Sambungan.....	85
4.10. Kurvatur Kolom.....	87
4.11. Perbandingan <i>Damage</i> Kolom Monolit dan Pracetak	91
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	95
5.1. Kesimpulan.....	95
5.2. Saran	95
DAFTAR PUSTAKA	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model Uji Lentur Balok B1(Wibowo et al. 2011)	8
Gambar 2.2 Model Uji Lentur Balok B2(Wibowo et al. 2011)	8
Gambar 2.3 Pola retak disaat runtuh di tengah bentang balok B1(Wibowo dkk, 2011)	9
Gambar 2.4 Pola retak disaat runtuh di tengah bentang balok B1(Wibowo et al. 2011)	9
Gambar 2.5 Kurva hubungan beban dan lendutan balok B1(Wibowo et al. 2011)	10
Gambar 2.6 Kurva hubungan beban dan lendutan balok B2 (Wibowo et al. 2011)	10
Gambar 2.7 Sambungan <i>dry joint</i> (a)Detail sambungan (b)Proses erection elemen pracetak (Tirtajaya et al. 2009)	11
Gambar 2.8 Model sambungan Lusas 13.5.7	12
Gambar 2.9 Model Benda Uji (Imran et al. 2009)	13
Gambar 2.10 Detail penampang kolom (Imran et al. 2009)	13
Gambar 2.11 Pembebanan Benda Uji(Imran et al. 2009)	15
Gambar 2.12 Kurva Histerisis Benda Uji (Imran et al. 2009)	15
Gambar 2.13 Penulangan dan detail potongan penampang: (a)kolom tanpa <i>grouted coupler</i> ;(b)kolom dengan <i>grouted coupler</i> ;(c)desain penampang Ou et al. (2015).....	16
Gambar 2.14 Perilaku historis (a) CH10 (b) GH10 (c) GW10 (d) CH33 (e) GH33 (d) GW33 (Ou et al. 2015)	18
Gambar 2.15 Kondisi Kerusakan pada 1,5% <i>nominal drift</i> (a) ke (f) dan 3% <i>nominal drift</i> (g) ke (l)Ou et al. (2015)	19
Gambar 2.16 Detail kolom dan pondasi (Sgambi et al. 2011)	21
Gambar 2.17 Gambar kolom pracetak (a) model numerik kolom pracetak (b), dan detail tulangan longitudinal dan sengkang (c) (Sgambi et al. 2011)	21
Gambar 2.18 Historis beban untuk analisis siklik(Sgambi et al. 2011)	22

Gambar 2.19 Perbandingan kurva perpindahan atas terhadap gaya geser dasar antara hasil eksperimental (garis titik) dan model numerik akibat beban <i>monotonic</i> (Sgambi et al. 2011).....	22
Gambar 2.20 Perbandingan kurva perpindahan atas terhadap gaya geser dasar akibat beban siklik (Sgambi et al. 2011)	23
Gambar 2.21 Retakan setelah eksperimen(a), retakan dari hasil analisis numerik pada potongan tengah(b), dan potongan tulangan longitudinal(c)	24
Gambar 2.22 Perilaku beton dengan gaya axial tekan dan tarik	27
Gambar 2.23 Hubungan tegangan-regangan dengan pendekatan <i>fracture energy</i>	28
Gambar 2.24 <i>Deformed shape</i> elemen SC50-150-0.2 (a) <i>Von-Mises stress of the steel tube</i> , (b) <i>Hardening parameter of the concrete core and</i> (c) <i>Confining pressure of the concrete core</i> (Piscesa et al. 2017)....	29
Gambar 2.25 Perbandingan axial load vs axial displacement diantara hasil eksperimental SC50-150-0.2, 3D-NLFEA dan CDPM in ABAQUS	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Pemodelan	32
Gambar 3.2 Penulangan dan detail potongan melintang kolom G10 (Ou et al. 2015).....	34
Gambar 3.3 Penulangan dan detail potongan melintang kolom G33 (Ou et al. 2015).....	34
Gambar 3.4 Detail blok beton atas dan bawah (Ou et al. 2015).....	35
Gambar 3.5 Hubungan tegangan-regangan tulangan longitudinal D25 SD685 (Alrasyid 2015)	36
Gambar 3.6 Hubungan tegangan-regangan tulangan transversal D13 SD785 Alrasyid (2015)	37
Gambar 3.7 Hubungan tegangan-regangan kolom persegi mutu tinggi yang diuji oleh Saatcioglu dan Razvi(1996) dalam Razvi and Saatcioglu (1999)	39
Gambar 3.8 Detail desain <i>grouted coupler</i> (Tokyo Tekko, 2005)	40
Gambar 3.9 Input data geometri pada ABAQUS	43
Gambar 3.10 Pemodelan <i>coupler</i> pada eksperimen	44

Gambar 3.11 Pemodelan <i>part coupler</i> pada ABAQUS	44
Gambar 3.12 Input luas elemen <i>coupler</i>	44
Gambar 3.13 Input data material pada ABAQUS.....	45
Gambar 3.14 Input data material beton pada ABAQUS.....	46
Gambar 3.15 Sambungan <i>grouted coupler</i> pada dasar kolom (Ou et al. 2015).....	49
Gambar 3.16 Bagian atas dari potongan bawah kolom dengan batang tulangan longitudinal (Ou et al. 2015).....	49
Gambar 3.17 Pelaksanaan <i>grouting</i> (Ou et al. 2015)	49
Gambar 3.18 Model numerik <i>assembly</i> kolom monolit pada ABAQUS.....	50
Gambar 3.19 Model numerik <i>assembly</i> sambungan <i>grouted coupler</i> dengan tulangan longitudinal pada ABAQUS	50
Gambar 3.20 Input <i>step</i> pada ABAQUS	51
Gambar 3.21 <i>Support restraint</i> kolom pracetak pada ABAQUS.....	52
Gambar 3.22 <i>Axial load</i> kolom pracetak pada ABAQUS.....	52
Gambar 3.23 Definisi <i>tie constraints</i> pada ABAQUS	53
Gambar 3.24 Definisi <i>embedded</i> pada ABAQUS.....	54
Gambar 3.25 Model numerik <i>meshing</i> tulangan transversal pada ABAQUS.....	55
Gambar 3.26 Model numerik <i>meshing</i> model 100 mm pada ABAQUS.....	55
Gambar 3.27 Perilaku historis : (a) G10 ; (b) G33 (Ou et al. 2015)	56
Gambar 3.28 Respon <i>envelop</i> : (a) G10 ; (b) G33 (Ou et al. 2015)	57
Gambar 4.1 Kurva tegangan-regangan model konstitutif tekan beton f_c74 menggunakan persamaan Razvi and Saatcioglu (1999)	61
Gambar 4.2 Kurva tegangan regangan beton mutu normal vs beton mutu tinggi menggunakan persamaan Attard and Setunge (1996)	61
Gambar 4.3 Kurva stress-strain Confined Unconfined pada tekan beton $f_c 74$	62
Gambar 4.4 Kurva tegangan-regangan model konstitutif tarik beton.....	62
Gambar 4.5 Kurva stress-strain Confined Unconfined pada tarik beton $f_c 74$	63
Gambar 4.6 Kurva tegangan-regangan model konstitutif tarik tulangan.....	63
Gambar 4.7 Pemodelan <i>coupler</i> pada kolom pracetak.....	64
Gambar 4.8 Kurva inelastic strain-yield <i>compressive stress</i> $f_c 74$	66
Gambar 4.9 Kurva inelastic strain-damage parameter <i>compressive stress</i> $f_c 74$...	66

Gambar 4.10 Kurva inelastic strain-damage parameter <i>compressive stress</i> f_c 74 sampai strain 0.12.....	67
Gambar 4.11 Boundary conditions model beton tekan	67
Gambar 4.12 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan persamaan Razvi and Saatcioglu (1999)	68
Gambar 4.13 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan persamaan Razvi and Saatcioglu (1999) dengan variasi parameter viskositas pada ABAQUS	69
Gambar 4.14 Kurva tegangan regangan beton tekan f_c 74 dengan input damage parameter vs tanpa damage parameter	70
Gambar 4.15 Kurva inelastic strain-yield <i>tensile stress</i> f_c 74	71
Gambar 4.16 Kurva inelastic strain-damage parameter beton tarik f_c 74	72
Gambar 4.17 Kurva inelastic strain-damage parameter beton tarik f_c 74 sampai strain 0.1	72
Gambar 4.18 Boundary condition model beton tarik	73
Gambar 4.19 Kurva tegangan-regangan beton akibat tarik menggunakan persamaan Hsu and Zhang (1996).....	74
Gambar 4.20 Plot simbol <i>deformed shape</i> (ABAQUS) tulangan longitudinal kuat leleh 713 MPa.....	75
Gambar 4.21 Kurva tegangan-regangan tulangan longitudinal kuat leleh 713 MPa akibat tarik menggunakan persamaan Mander (1983).....	75
Gambar 4.22 Kurva force-displacement kolom beton monolit C10 hasil ABAQUS vs eksperimen spesimen CH10 oleh Ou et al. (2015).....	76
Gambar 4.23 <i>Mesh</i> dan <i>boundary conditions</i> yang digunakan pada model kolom beton	78
Gambar 4.24 <i>Damage Compressive</i> kolom beton monolit C10 hasil ABAQUS..	78
Gambar 4.25 Kurva force-displacement kolom beton pracetak G10 vs eksperimen spesimen GH10 oleh Ou et al. (2015).....	80
Gambar 4.26 Kurva force-displacement kolom beton pracetak C10 vs G10.....	81
Gambar 4.27 Pemodelan Kolom Terkekang	82
Gambar 4.28 Hasil output <i>displacement</i> spesimen G10 confined.....	83

Gambar 4.29 Kurva force displacement spesimen C10 confined vs eksperimen CH10.....	83
Gambar 4.30 Hasil output displacement yang terjadi pada spesimen C33	84
Gambar 4.31 Hasil output displacement yang terjadi pada spesimen G33.....	85
Gambar 4.32 Tegangan S11 tulangan pada spesimen C10.....	86
Gambar 4.33 Tegangan S11 tulangan pada spesimen C10.....	86
Gambar 4.34 Tegangan S11 tulangan pada spesimen G10.....	87
Gambar 4.35 Tegangan S11 tulangan pada spesimen G10.....	87
Gambar 4.36 Rata-rata kurvatur sepanjang kolom C10 metode full node.....	88
Gambar 4.37 Rata-rata kurvatur sepanjang kolom G10 metode full node	89
Gambar 4.38 Rata-rata kurvatur sepanjang kolom C10 vs G10 metode full node	90
Gambar 4.39 Hasil korelasi kurvatur spesimen C10.....	90
Gambar 4.40 Hasil korelasi kurvatur spesimen G10	91
Gambar 4.41 Perbandingan kerusakan tekan pada kolom C10 dan G10.....	92
Gambar 4.42 Perbandingan kerusakan tekan pada kolom C10 dan G10.....	92
Gambar 4.43 Perbandingan regangan plastis pada kolom C10 dan G10.....	93

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil Uji Kuat Tarik Baja	14
Tabel 2.2 Hasil Uji Kuat Tekan Beton.....	14
Tabel 2.3 Parameter tulangan longitudinal desain kolom.....	16
Tabel 2.4 Parameter tulangan transversal desain kolom.....	17
Tabel 2.5 Hasil uji sambungan <i>bar-grouted</i> monotonik	17
Tabel 2.6 Hasil uji sambungan <i>bar-grouted</i> siklik	17
Tabel 2.7 Hubungan tekanan lateral vs <i>drift</i>	18
Tabel 2.8 Data mutu material.....	20
Tabel 3.1 Properti tarik SD685 dan SD785 dari Taiwan	36
Tabel 3.2 Parameter desain kolom.....	37
Tabel 3.3 Parameter desain <i>grouted coupler</i>	39
Tabel 3.4 Hasil uji sambungan <i>grouted coupler</i> -tulangan ulir terhadap beban monoton	40
Tabel 3.5 Hasil uji sambungan <i>grouted coupler</i> -tulangan ulir terhadap beban siklik	40
Tabel 4.1 Properti beton pada kolom	60
Tabel 4.2 Properti tulangan pada kolom	60
Tabel 4.3 Luas elemen tulangan dan coupler.....	64
Tabel 4.4 Beban aksial pada model kolom	65
Tabel 4.5 Beban lateral displacement pada model kolom.....	65
Tabel 4.6 Akurasi tegangan ultimit pada studi parameter beton tekan dengan perbedaan parameter viskositas	69
Tabel 4.7 Akurasi studi parameter material beton dan tulangan.....	75
Tabel 4.8 Korelasi hasil kurva <i>force - displacement</i> spesimen C10	78
Tabel 4.9 Korelasi hasil kurva <i>force - displacement</i> spesimen G10	80

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Biaya yang murah, kekakuan yang lebih tinggi, dan isolasi suara yang lebih baik adalah manfaat penggunaan konstruksi beton bertulang dibandingkan konstruksi baja. Penggunaan material mutu tinggi dan beton pracetak dapat menjadi solusi pengurangan dimensi dan kecepatan proses konstruksi beton konvensional pada bangunan gedung tinggi khususnya elemen kolom (Ou et al. 2015). Peningkatan luas lantai yang tersedia pada gedung-gedung tinggi bangunan beton bertulang yang menuntut kebutuhan untuk membatasi ukuran kolom pada lantai bawah membuat peningkatan perhatian pada bahan (beton dan besi) mutu tinggi (Ou and Kurniawan 2015). Penelitian kolom pracetak dengan sambungan di Indonesia yang menggunakan baja mutu tinggi dilakukan oleh Imran et al. (2009) pada tahun 2009. Imran et al. (2009) melakukan studi eksperimental sambungan kolom-kolom pada sistem beton pracetak dengan menggunakan *sleeves*. Pengujian dilakukan menggunakan beton dengan kekuatan tekan 30 MPa dan baja tulangan dengan kekuatan leleh 365 MPa, 642 MPa, dan 655 MPa. Ou and Kurniawan (2015) melakukan pengujian terhadap kolom beton mutu tinggi dengan menggunakan tulangan *longitudinal* SD685 dan tulangan *transversal* SD785.

Tulangan *longitudinal* SD685 dengan kekuatan leleh 685 MPa, tulangan *transversal* SD785 dengan kekuatan leleh 785 MPa, dan beton mutu tinggi dengan kekuatan tekan diatas 100 MPa adalah beberapa bahan mutu tinggi yang dikembangkan dengan adanya kemajuan teknologi bahan di Taiwan dan sekarang sudah tersedia secara komersial (Ou and Kurniawan 2015). Ou et al. (2015) melakukan penelitian tentang perilaku siklik kolom beton bertulang pracetak dengan menggunakan baja mutu tinggi SD685 dan SD785. Safi (2017) melakukan kajian perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan metode *finite element* untuk membandingkan dengan hasil eksperimental yang dilakukan Alrasyid (2015).

Konstruksi struktur beton pracetak dapat membuat kontrol biaya dan kualitas lebih mudah, menghemat waktu, tenaga kerja, dan konsumsi energi dibandingkan konstruksi beton konvensional (Yan et al. 2018). Pada bangunan dengan struktur beton pracetak kontinuitas antar elemen dapat menjadi titik lemah jika bangunan harus mempunyai tahanan yang cukup terhadap beban horisontal (Sgambi et al. 2011). Kunci utama keberhasilan pabrikasi beton pracetak adalah pada desain sambungan. Sambungan antar elemen monolit menentukan perilaku struktur dari rangka beton bertulang pracetak (Tullini and Minghini 2016). Alias et al. (2013) menjelaskan bahwa sambungan *grouted sleeve coupler* merupakan *coupler* mekanis yang dirancang dengan diisi cairan campuran semen dan air (*grouting*) sebagai ikatan material sambungan tulangan besi untuk memberikan keamanan sambungan selama transfer beban yang terjadi.

Pada tahun 2011, Luca Sgambi, Sergio Zambelli, Claudio Pagani, dan Franco Bontempi telah melakukan pemodelan untuk mengembangkan analisis numerik dari eksperimental yang dilakukan untuk menyelidiki perilaku mekanis kolom beton pracetak yang memiliki ukuran penampang 0,5 x 0,5 meter dengan tinggi 5 meter dan tersambung pada struktur pondasi dengan menggunakan program berbasis elemen hingga, yaitu ABAQUS. Hasil analisis dari Luca Sgambi dkk, berdasarkan kurva hubungan *displacement on top* dan *force* pada perbandingan antara pengukuran eksperimental dan evaluasi numerik menunjukkan bahwa respon yang sangat baik dari segi kekuatan *ultimate* dan kemampuan berdeformasi mampu diberikan oleh pemodelan numerik.

Penelitian Haber et al. (2015) tentang sambungan besi pada kolom pracetak menghasilkan pernyataan bahwa “Sambungan mekanis secara signifikan dapat mengurangi kapasitas deformasi sambungan tulangan besi sebanyak 75%, yang dapat mempunyai efek nyata pada perilaku momen puntir lokal dari sebuah batang beton bertulang daktail yang tergantung pada ukuran dan kekakuan sambungan ke tulangan besi”. Haber et al. (2015) melakukan penelitian eksperimental pada *headed coupler* (HC) dan *grouted sleeve coupler* (GC). Haber et al. (2015) mengevaluasi kedua jenis sambungan tersebut dengan beban statis

dan dinamis monoton sampai mengalami kegagalan, beban siklik lambat sampai mengalami kegagalan, dan serangkaian uji slip elastik.

Penelitian Ou et al. (2015) tentang kolom pracetak menggunakan sambungan besi *coupler* menghasilkan pernyataan bahwa “Hasil uji eksperimental kolom pracetak dengan sambungan *grouted coupler* menunjukkan bahwa perilaku kolom dengan *grouted coupler* terhadap gempa sebanding dengan perilaku kolom monolit”. Ou et al. (2015), melakukan penelitian eksperimental terhadap kolom monolit konvensional dan kolom beton bertulang mutu tinggi pracetak dengan sambungan besi *grouted coupler* yang diberikan *lateral displacement* dan beban aksial konstan pada 6 sampel benda uji kolom beton mutu tinggi. Ou et al. (2015), melakukan pengujian kolom monolit sebagai dasar untuk mengevaluasi pengaruh sambungan *grouted coupler* pada perilaku siklik kolom beton bertulang pracetak. Namun seperti yang sudah dijelaskan bahwa, pada penelitian ini Ou et al. (2015), belum melakukan pemodelan software yang berbasis metode elemen hingga (ABAQUS) sebagai perbandingan dengan uji eksperimental yang telah dilakukan. Penelitian eksperimental di Indonesia mengenai kolom pracetak dengan sambungan *sleeve* yang dilakukan oleh Imran et al. (2009) tidak menggunakan beban aksial melainkan hanya menggunakan beban *lateral displacement* pada pembebanan pada kolom pracetak sehingga kolom tidak mencirikan kondisi kolom pada struktur gedung sesungguhnya. Imran et al. (2009) masih menggunakan baja mutu normal pada penelitian eksperimental mengenai kolom pracetak dengan sambungan *sleeve* yang dilakukan.

Tujuan penelitian ini adalah memodelkan perilaku kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sistem sambungan *grouted sleeve coupler* pada besi (tulangan) menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan program bantu ABAQUS. Pemodelan kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* diberikan beban kombinasi, yaitu beban aksial dan simpangan lateral (*lateral displacement*). Hal ini dilakukan untuk memverifikasi hubungan antara beban *lateral displacement* terhadap perpindahan (*displacement*) yang terjadi dari kajian numerik (FEM) diverifikasi dengan hasil pengujian eksperimental kolom beton pracetak mutu tinggi dengan

sambungan *grouted sleeve coupler* berupa hubungan antara beban *lateral displacement* terhadap perpindahan (*displacement*) yang telah dilakukan Ou et al. (2015).

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, terdapat beberapa hal yang menjadi pokok pembahasan antara lain :

1. Bagaimana perilaku kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* berdasarkan hubungan *applied load* terhadap *drift* akibat beban aksial dan *lateral displacement* dengan perangkat lunak ABAQUS.
2. Bagaimana hasil korelasi perilaku kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* antara hasil eksperimental dari Ou et al. (2015) dan analisis metode elemen hingga dengan perangkat lunak ABAQUS berdasarkan hubungan *force - drift (%)*.
3. Bagaimana mencari hasil korelasi antara perilaku kolom beton mutu tinggi dan pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* berdasarkan hubungan *force - drift (%)* pada hasil FEA ABAQUS.
4. Bagaimana mencari hasil korelasi perilaku kolom beton mutu tinggi dan kolom beton pracetak mutu tinggi berdasarkan tegangan tulangan longitudinal yang terjadi pada sambungan kolom - blok beton pada hasil analisis ABAQUS.

1.3. Ruang Lingkup

Analisis ini akan dibatasi oleh beberapa parameter. Parameter yang akan dibatasi adalah sebagai berikut:

1. Batasan penampang kolom yang digunakan adalah penampang persegi.
2. Ukuran penampang kolom yang digunakan adalah 600 mm x 600 mm.
3. Spesifikasi tulangan longitudinal kolom adalah 16 tulangan dengan dimensi 16 mm (16D25).

4. Spesifikasi tulangan transversal kolom yang digunakan adalah dimensi 13 mm dengan spasi antar tulangan 100 mm (D13@100).
5. Spesifikasi kuat tekan beton adalah 70 MPa.
6. Mutu tulangan longitudinal mutu tinggi dengan spesifikasi kuat leleh 685 MPa (SD685).
7. Mutu tulangan transversal mutu tinggi dengan spesifikasi kuat leleh 785 MPa (SD785).
8. Software yang digunakan dalam analisis sebagai alat bantu adalah ABAQUS.
9. Hasil analisa yang ditinjau adalah hubungan antara *lateral displacement* dan perbandingan simpangan yang terjadi dengan tinggi kolom (*drift*).

1.4. Tujuan Penelitian

Kajian pembahasan ini mempunyai tujuan spesifik yang terkait dengan rumusan masalah tersebut antara lain :

1. Mencari perilaku kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* berdasarkan hubungan *force - drift* (%) akibat beban aksial dan *lateral displacement* dengan perangkat lunak ABAQUS.
2. Mencari hasil korelasi perilaku kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* antara hasil eksperimental dari Ou et al. (2015) dan analisis metode elemen hingga dengan perangkat lunak ABAQUS berdasarkan hubungan *force - drift* (%).
3. Mencari hasil korelasi antara perilaku kolom beton mutu tinggi dan pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* berdasarkan hubungan *force - drift* (%) pada hasil FEA ABAQUS.
4. Mencari hasil korelasi perilaku kolom beton mutu tinggi dan kolom beton pracetak mutu tinggi berdasarkan tegangan tulangan longitudinal

yang terjadi pada sambungan kolom - blok beton pada hasil analisis ABAQUS.

1.1. Manfaat Penelitian

Dampak langsung maupun tidak langsung dari kajian tesis adalah kepada seluruh elemen masyarakat Indonesia antara lain :

1. Pemerintah memperoleh informasi terkait perilaku kolom pracetak sambungan besi *grouted sleevecoupler*.
2. Kontraktor/konsultan memperoleh informasi terkait kinerja kolom pracetak dengan sambungan besi *grouted sleevecoupler*.
3. Pihak akademik memperoleh pengetahuan tentang perilaku kolom pracetak mutu tinggi dengan sambungan besi *grouted sleevecoupler*.
4. Pihak akademik memperoleh pengetahuan tentang perilaku struktur utama kolom pracetak sambungan besi *grouted sleevecoupler* dengan menggunakan metode elemen hingga dibandingkan dengan hasil eksperimental.
5. Pihak akademik dapat menerapkan pemodelan kolom pracetak sambungan besi menggunakan *grouted sleevecoupler* dengan metode elemen hingga .

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pendahuluan

Bab ini memberikan literatur berupa hasil dari eksperimen-eksperimen yang dilakukan sebelumnya mengenai perilaku sambungan pada kolom beton pracetak. Penelitian sebelumnya mengenai eksperimen pada kolom beton pracetak mutu tinggi menggunakan sambungan *grouted coupler* dan pemodelan numerik kolom beton pracetak yang dibandingkan dengan hasil eksperimental juga dijelaskan dalam bab ini.

2.2. Umum

Pada sistem beton pracetak bagian kritis akan terjadi pada daerah sambungan yang harus direncanakan agar berperilaku baik karena sambungan digunakan untuk menyambungkan antar elemen struktur yang menerima transfer beban gravitasi dan lateral (Imran et al. 2009). *Grouted Coupler*, secara garis besar telah digunakan sebagai sambungan pada konstruksi beton pracetak pada bangunan bertingkat tinggi. Pembahasan tentang sambungan struktur pracetak cukup menarik pada bangunan di daerah gempa (Sgambi et al. 2011).

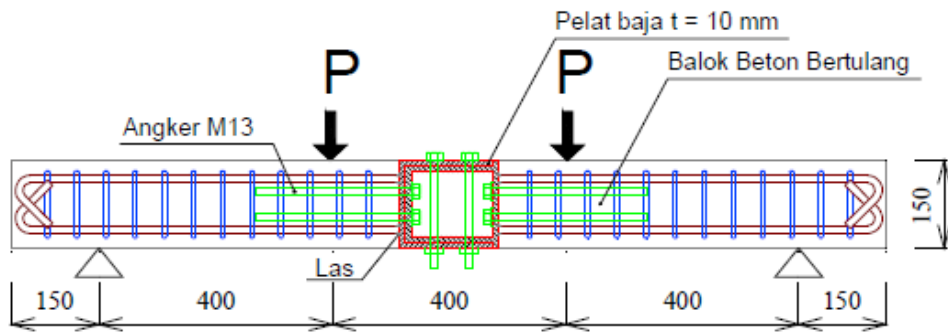
2.3. Beton Pracetak Menggunakan Sambungan

Berikut ini adalah beberapa penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan sambungan pada beton pracetak secara analisa eksperimental.

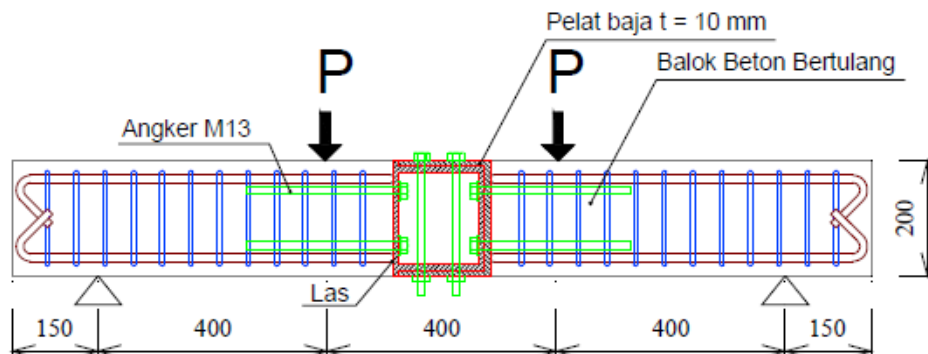
2.3.1. Beton Pracetak Menggunakan Sambungan Kering

Wibowo et al. (2011) melakukan studi perilaku terhadap sambungan kering pada balok beton pracetak untuk rumah sederhana tahan gempa akibat beban statik. Mengetahui pola retak yang terjadi pada balok pracetak akibat beban statik serta mendapatkan nilai daktilitasnya adalah tujuan dari penelitian ini. Sambungan kering yang dipakai dalam penelitian Wibowo et al. (2011) adalah plat dan baut angkur. Pemodelan benda uji terdiri dua jenis balok, yaitu pemodelan balok untuk bangunan lantai 1 dan lantai 2. Balok untuk bangunan lantai 1 digunakan balok dengan ukuran $15 \times 15 \text{ cm}^2$ dengan tulangan lentur $4\phi 10$

mm dan tulangan geser $\varnothing 10$ -50 mm. Balok untuk bangunan lantai 2 digunakan balok dengan ukuran $15 \times 20 \text{ cm}^2$ dengan tulangan lentur 6D13 mm dan tulangan geser $\varnothing 10$ -50 mm dengan mutu beton 20 MPa dan mutu tulangan 240 MPa. Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 menyajikan model sambungan yang diuji dalam studi ini.



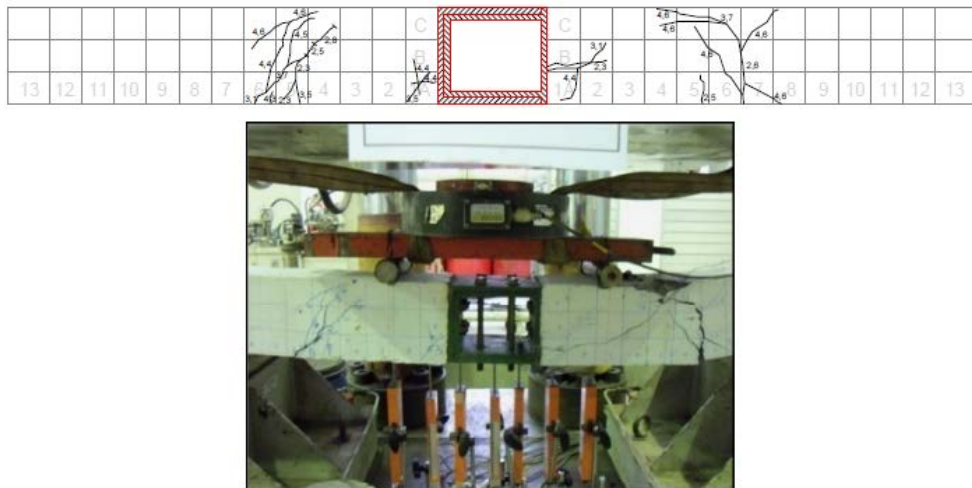
Gambar 2.1 Model Uji Lentur Balok B1(Wibowo et al. 2011)



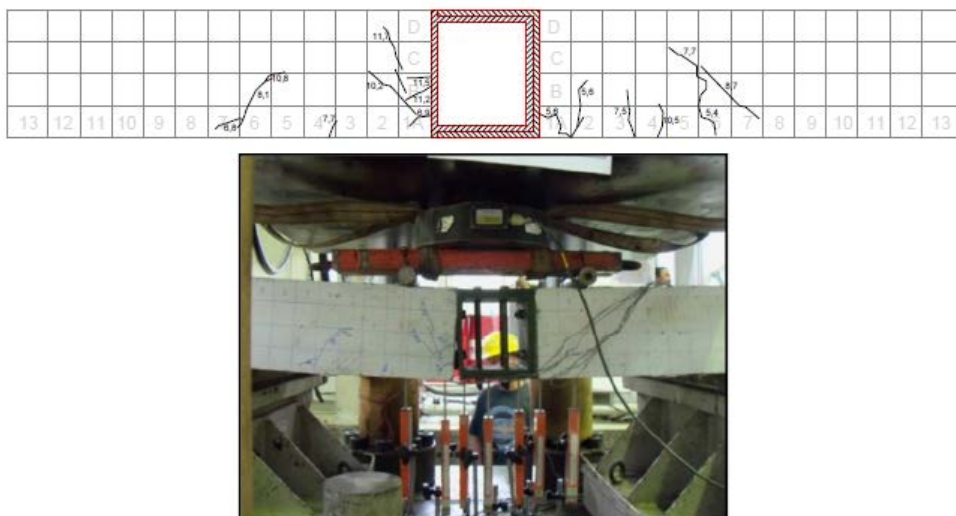
Gambar 2.2 Model Uji Lentur Balok B2(Wibowo et al. 2011)

Pada pengujian tersebut digunakan plat baja dengan tebal 10 mm dengan mutu 320 MPa, angkur dengan diameter 13 mm, dan baut HTB (High Tension Bolt) A325. Pembebanan dilakukan di dua titik secara statik yang diberikan terus menerus sampai balok atau sambungan mengalami kelelahan. Dari hasil penelitian didapatkan pada balok B1 mengalami kegagalan beton terlebih dahulu pada saat beban 2,3 ton terjadi keretakan lentur awal pada daerah tarik beton 5A-5B kemudian merambat ke daerah tekan beton pada beban 3,7 ton seperti yang disajikan pada Gambar 2.3. Pada balok 2 mengalami keretakan lentur pertama kali di daerah tarik beton 6A-6B bentang kanan pada beban 5,4 ton hingga pada

saat beban 9,1 ton sambungan las pada tulangan tarik bentang kiri terputus seperti yang disajikan pada Gambar 2.4.

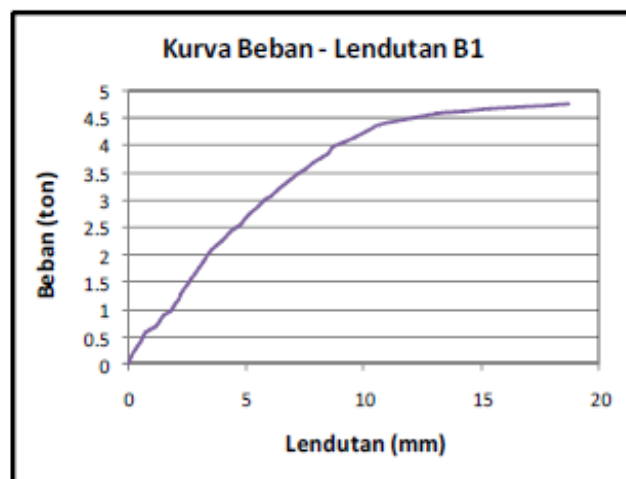


Gambar 2.3 Pola retak disaat runtuh di tengah bentang balok B1(Wibowo dkk, 2011)

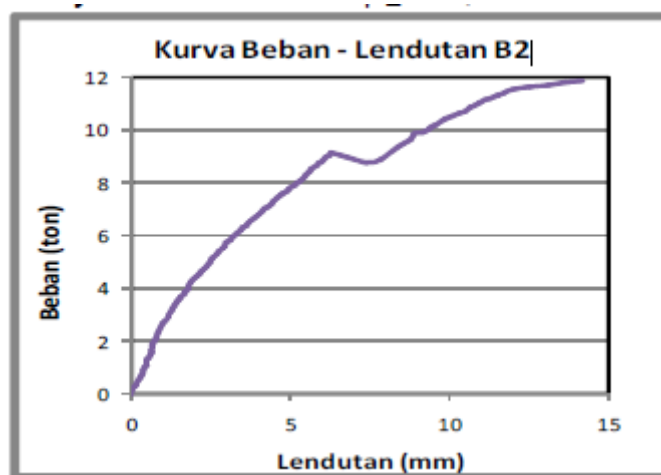


Gambar 2.4 Pola retak disaat runtuh di tengah bentang balok B1(Wibowo et al. 2011)

Berdasarkan kurva hubungan beban dan lendutan balok B1 yang disajikan pada Gambar 2.5 didapatkan nilai daktilitas lendutannya sebesar $\mu\Delta = 4.75$. Berdasarkan kurva hubungan beban dan lendutan balok B2 yang disajikan pada Gambar 2.6 didapatkan nilai daktilitas lendutannya sebesar $\mu\Delta = 5.18$.



Gambar 2.5 Kurva hubungan beban dan lendutan balok B1(Wibowo et al. 2011)

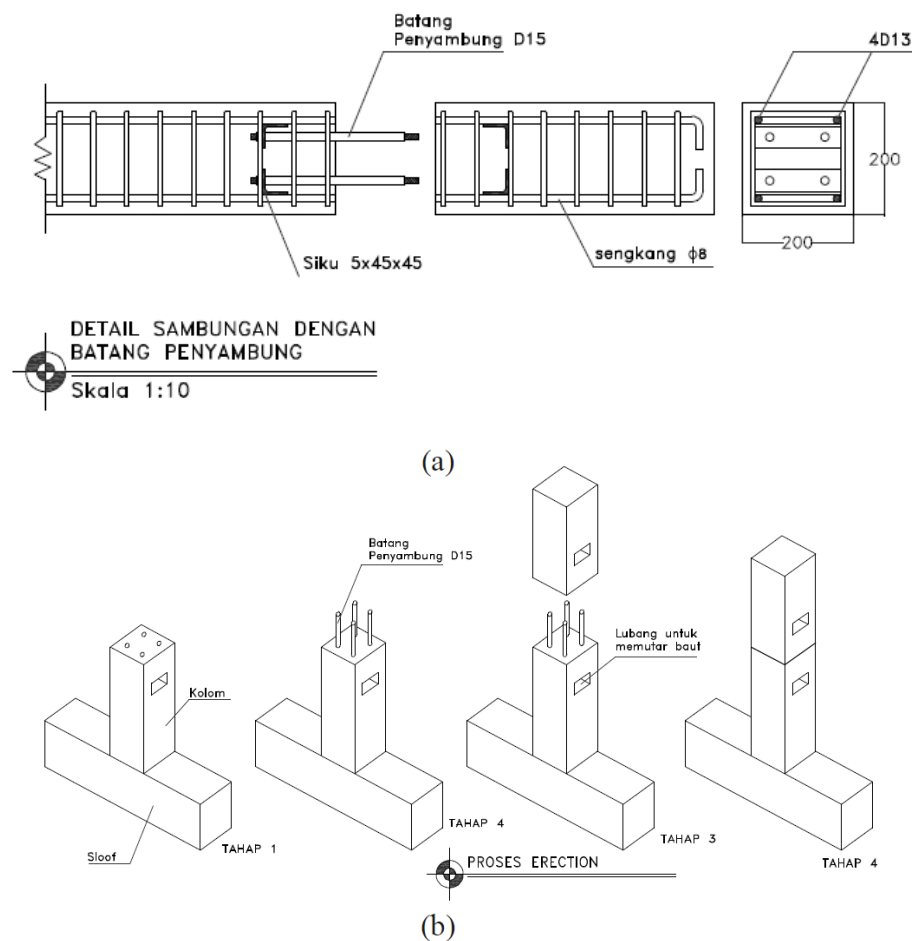


Gambar 2.6 Kurva hubungan beban dan lendutan balok B2 (Wibowo et al. 2011)

Adi et al. (2014)menganalisis perilaku dan kekuatan sambungan kolom pada sistem beton pracetak yang bertujuan memahami perilaku sambungan kolom beton pracetak dan kekakuannya. Penelitian ini membandingkan kolom monolit dan sambungan kering. Sambungan kering menggunakan plat dan baut mur. Eksperimen ini dilakukan dengan melakukan pengujian kuat tarik pada baja dan kuat tekan pada beton terlebihbuih dahulu untuk mengetahui mutu aktual dari materilal yang akan digunakan pada pengujian kolom. Selanjutnya dilakukan pengujian beban aksial kolom yang dilakukan dengan pembebanan yang bervariasi. Hasil pengujian berupa beban maksimum, lendutan horisontal, lendutan vertikal, modulus elastisitas, dan retak geser antara kolom monolit dan

kolom dengan sambungan. Berdasarkan hubungan lendutan yang terjadi dengan beban dapat disimpulkan bahwa kekakuan benda uji kolom monolit lebih kecil daripada benda uji kolom dengan sambungan.

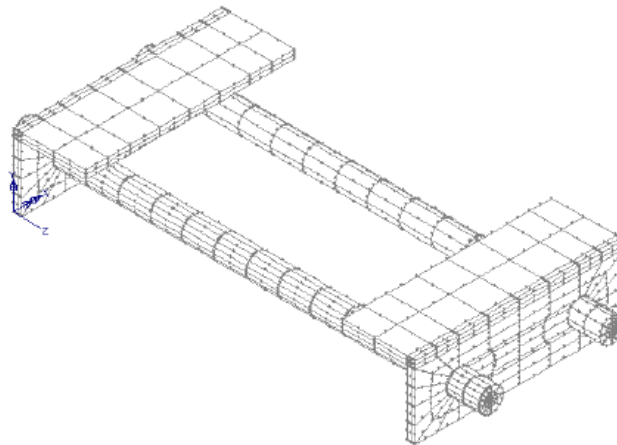
Tirtajaya et al. (2009), Dalam penelitiannya yang berjudul "*Design of Precast Concrete Column for Earthquake Resistant and Fast-Build House with Infill Frame System*" menganalisa sambungan *dry joint* sebagai sambungan antar kolom beton pracetak yang menggunakan batang baja yang dibaut.



Gambar 2.7 Sambungan *dry joint* (a)Detail sambungan (b)Proses erection elemen pracetak (Tirtajaya et al. 2009)

Gambar 2.7 menyajikan proses *erection* elemen pracetak dengan cara memasang kolom pracetak bagian atas ke kolom pracetak bagian bawah yang sudah dipasang batang penyambung pada lubang kolom pracetak bagian bawah dengan dipasang mur. Kemudian dilakukan pengencangan mur bagian bawah

maupun bagian atas. Selanjutnya dilakukan *grouting* pada lubang-lubang yang ada. Program Lusas 13.5.7 digunakan untuk menganalisa sambungan untuk mengetahui kemampuan leleh dan putusnya. Pemodelan dilakukan dengan menganggap kolom balok kantilever sederhana yang mengalami beban luar. Model mengaplikasikan lokasi sambungan yang mengalami gaya dalam seperti yang disajikan pada Gambar 2.8.

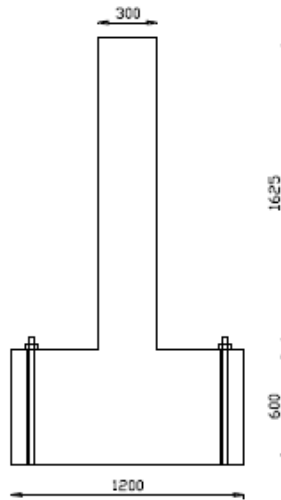


Gambar 2.8 Model sambungan Lusas 13.5.7

Tirtajaya et al. (2009) menyimpulkan bahwa perilaku daktilitas penuh ditunjukkan oleh sambungan *dry joint* berupa batang penyambung yang diusulkan. Namun perlu adanya pemodelan secara menyeluruh kolom beton pracetak beserta sambungannya sehingga diharapkan dapat menghasilkan displacemet yang lebih akurat.

2.3.2. Kolom Beton Pracetak Menggunakan Sambungan *Sleeves*

Di indonesia penelitian mengenai sambungan *sleeve* pada kolom-kolom pracetak dilakukan oleh Imran et al. (2009) dengan judul penelitian " Studi Eksperimental Sambungan Kolom-Kolom Pada Sistem Beton Pracetak Dengan Menggunakan *Sleeves*". Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku sistem *sleeves* pada sambungan kolom-kolom beton pracetak yang terjadi akibat beban lateral (Imran et al. 2009). Pengujian dilakukan dengan membuat model pondasi-kolom dengan pengangkuran di *strong floor* pada pondasi sebagai asumsi jepit seperti yang disajikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Model Benda Uji (Imran et al. 2009)

	Ukuran(mm)	300x300
	Tulangan Longitudinal(mm)	4D25
	Sengkang (mm)	D10-75
	Cover(mm)	40
	f_c	30 MPa
	f_y	400 MPa
	Ukuran(mm)	300x300
	Tulangan Longitudinal(mm)	6D25
	Sengkang (mm)	D10-75
	Cover(mm)	40mm
	f_c	30 MPa
	f_y	400 MPa

Gambar 2.10 Detail penampang kolom (Imran et al. 2009)

Gambar 2.10 menunjukkan detail penampang kolom yang akan diuji pada penelitian Imran et al. (2009). Pada penelitian tersebut menggunakan dua spesimen kolom. Kolom pertama menggunakan tulangan longitudinal 4D25 dan dengan kuat leleh aktual yang tersaji pada Tabel 2.1 dan tulangan transversal D16 dengan rasio tulangan longitudinal 2,18 %. Kolom kedua menggunakan tulangan longitudinal 6D25 dan dengan kuat leleh aktual yang tersaji pada Tabel 2.1 dan tulangan transversal D16 dengan rasio tulangan longitudinal 3,3 %.

Tabel 2.1 Hasil Uji Kuat Tarik Baja

Material	Kuat Leleh(MPa)	Kuat Ultimit(MPa)
T. Ulir D25 (1)	365	529
T. Ulir D25 (2)	642	850
T. Ulir D16	655	781

Sumber: Imran et al. (2009)

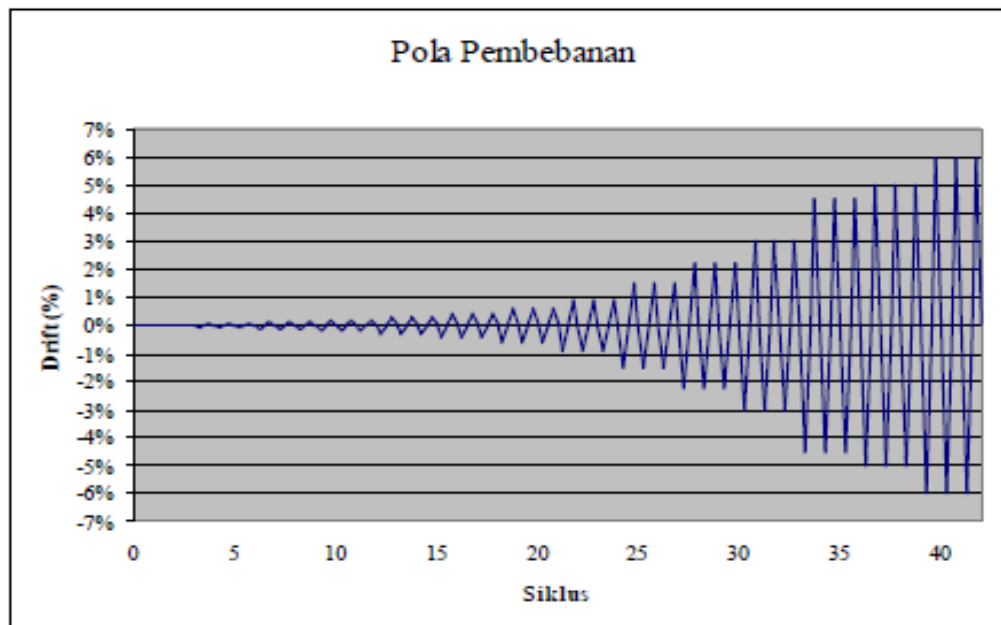
Mutu beton yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah kuat tekan rencana 30 MPa yang dilakukan uji tekan aktual yang disajikan pada Tabel 2.2. Dalam penelitian ini juga diuji kuat lekat material *grouting* yang digunakan dengan menguji tarik pada *sleeve* yang sudah dilakukan penginjeksian material *grouting* agar keruntuhan cabut tidak terjadi. Hasil pengujian didapatkan hasil gaya cabut dari pengujian kuat tarik *sleeve* yang diinjeksi mortar terhadap tulangan longitudinal 25 mm dengan kuat tarik 642 MPa adalah sebesar 419-416 kN(27,85 MPa-28,32 MPa).

Tabel 2.2 Hasil Uji Kuat Tekan Beton

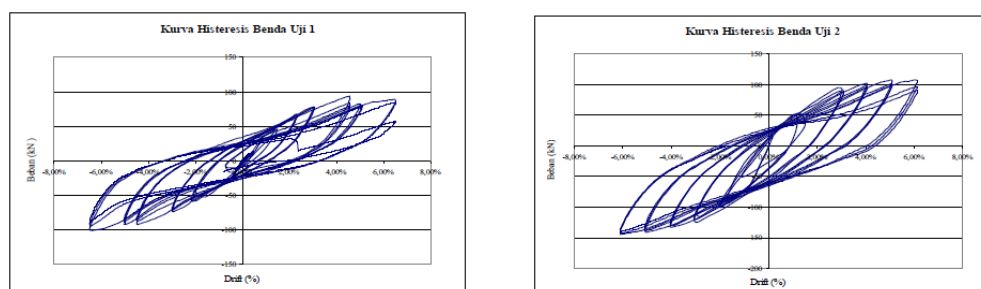
Deskripsi	Kuat Tekan Beton (MPa)			Rata-rata (MPa)
	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	
Beton 14 hari	29,97	28,96	30,56	30,17
Beton 21 hari	32,43	31,99	33,20	32,54
Beton 28 hari	36,7	33,31	35,15	35,06

Sumber: Imran et al. (2009)

Pengujian kolom pracetak dilakukan dengan cara membebani ujung kolom dengan beban lateral siklik seperti yang disajikan pada Gambar 2.11. Hasil pengujian kolom akibat beban lateral siklik didapatkan kurva histerisis hubungan antara beban lateral terhadap *drift* yang terjadi disajikan pada Gambar 2.12. Dari kurva tersebut Imran et al. (2009) menyimpulkan "perilaku yang baik pada saat menerima beban lateral ditunjukkan dengan kurva histerisis yang gemuk serta tidak mengalami degradasi kekuatan dan kekakuan yang berlebihan".



Gambar 2.11 Pembebanan Benda Uji (Imran et al. 2009)

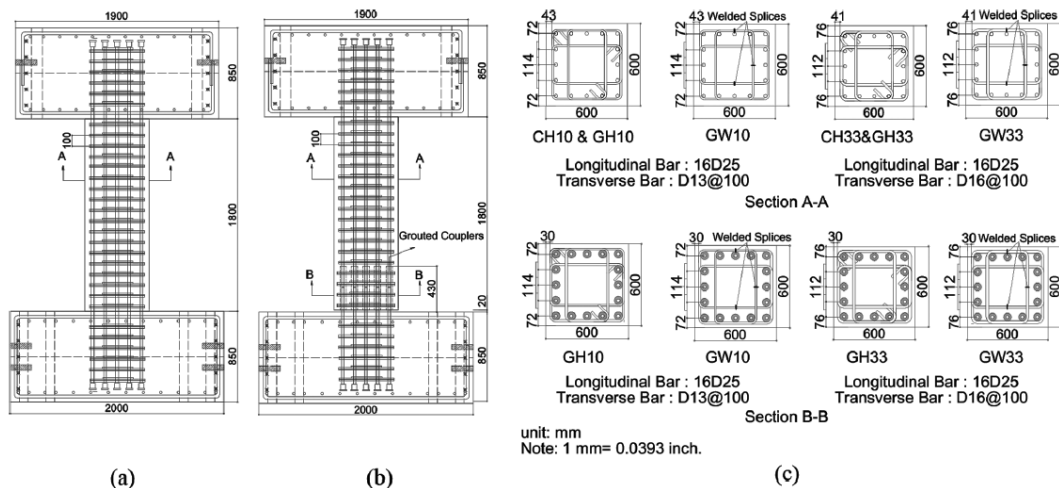


Gambar 2.12 Kurva Histeresis Benda Uji (Imran et al. 2009)

2.4. Experimental Program Sebelumnya

Ou et al. (2015) melakukan pengujian terhadap kolom pracetak menggunakan sambungan besi *grouted coupleryang* dibebani aksial dan simpangan lateral (*lateral displacement*) bolak-balik. Tujuan dari uji eksperimental ini adalah untuk mengamati perilaku siklik dari kolom beton bertulang pracetak mutu tinggi dengan perilaku kolom monolit sebagai pengevaluasinya. Gambar 2.13 menunjukkan potongan melintang dan ukuran pada kolom. Kolom tersebut menggunakan SD685 16D25 sebagai tulangan longitudinal dengan kuat leleh aktual 713 MPa dan menggunakan SD785 D13 dan D16 sebagai tulangan transversal dengan kuat leleh aktual 818-886 MPa berdasarkan uji tarik aktual yang dilakukan Ou et al. (2015). Kekuatan tekan

beton bervariasi 73-77 MPa berdasarkan uji tekan aktual yang dilakukan Ou et al. (2015). Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 menunjukkan hasil uji tarik tulangan dan uji tekan beton parameter desain kolom yang dilakukan Ou et al. (2015).



Gambar 2.13 Penulangan dan detail potongan penampang: (a)kolom tanpa *grouted coupler* ;(b)kolom dengan *grouted coupler* ;(c)desain penampang Ou et al. (2015)

Tabel 2.3 Parameter tulangan longitudinal desain kolom

Nama	Beton f'_c , MPa	Tulangan longitudinal			
		Ukuran	ρ , %	Sambungan	f_{yb} , MPa f_{ul} , MPa
CH10	77	16 D25	2.18	C	713 932
GH10	74			G	
GW10	73			G	
CH33	75			C	
GH33	77			G	
GW33	77			G	

Sumber: Ou et al. (2015)

Sambungan *coupler* dalam penelitian ini menggunakan *grouted sleeve coupler* dengan mutu aktual dari hasil uji yang dilakukan Ou et al. (2015). Uji sambungan dilakukan dengan memberikan beban monoton dan beban siklik. Tabel 2.5 dan Tabel 2.6 menunjukkan hasil uji *bar-grouted* yang dilakukan sebelum pengujian kolom beton pracetak dengan sambungan *grouted sleeve coupler*.

Tabel 2.4 Parameter tulangan transversal desain kolom

Nama	Ukuran	Tulangan transversal					<i>Axial load</i>
		s, mm	ρ_b , %	Tipe	f_{yb} , MPa	f_{ut} , MPa	$P/A_g f'_c$
CH10	D13	100	2	C	886	1095	0.1
GH10	D13		2	G	886	1095	0.1
GW10	D13		2	G	868	1104	0.1
CH33	D16		3.1	C	836	1020	0.33
GH33	D16		3.1	G	836	1020	0.33
GW33	D16		3.1	G	818	1022	0.33

Sumber: Ou et al. (2015)

Tabel 2.5 Hasil uji sambungan *bar-grouted* monotonik

Uji tarik monotonik				
No. Benda Uji	f_{ua} , MPa	f_{ua}/f_{ys}	δ_{slip} , mm	e_a
	$\geq f_{us}$ (860)	≥ 1.25	≤ 0.3	≥ 0.4
1	900	1.31	0.108	NA
2	900	1.31	0.077	NA
3	895	1.31	0.11	NA
Rata-rata	898	1.31	0.098	NA

Sumber: Ou et al. (2015)

Tabel 2.6 Hasil uji sambungan *bar-grouted* siklik

Uji tarik siklik					
No. Benda Uji	f_{ua} , MPa	f_{ua}/f_{ys}	$\delta_{slip20c}$, mm	$\delta_{slip24c}$, mm	$\delta_{slip28c}$, mm
	$\geq f_{us}$ (860)	≥ 1.25	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.9
1	881	1.29	0.127	0.163	0.274
2	868	1.27	0.175	0.145	0.465
3	885	1.29	0.196	0.152	0.376
Rata-rata	878	1.28	0.166	0.153	0.372

Sumber: Ou et al. (2015)

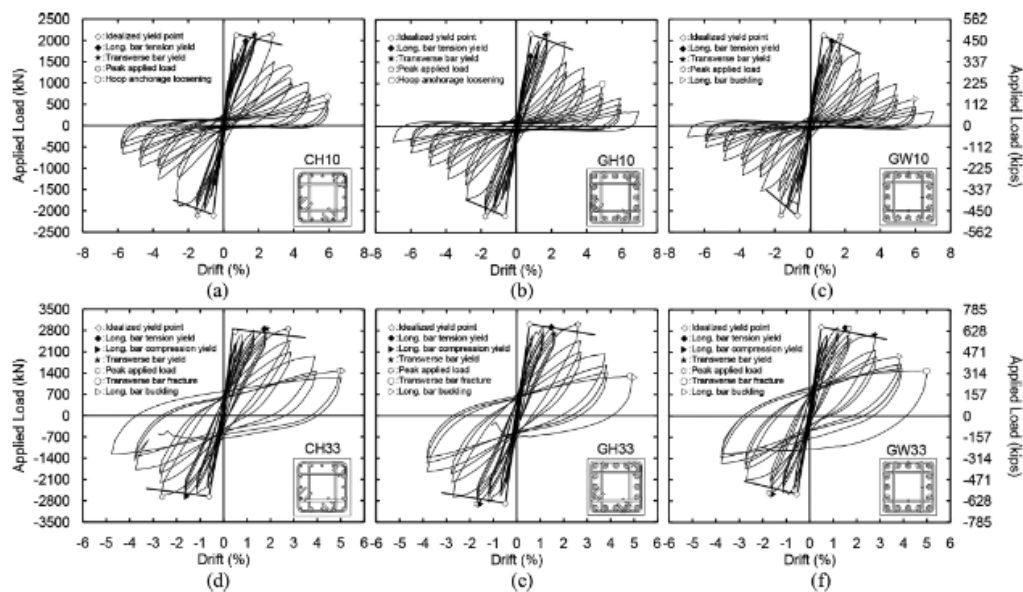
Kolom diuji dengan konstruksi kolom monolit menggunakan tulangan sengkang transversal dengan angkur (CH10 dan CH33) dan kolom beton pracetak sambungan *grouted coupler* menggunakan angkur dan las (GH10, GH33, GW10, dan GW33) dengan masing-masing beban aksial $0,1 A_g f'_c$ dan $0,33 A_g f'_c$ dan rasio *drift* untuk beban *lateral displacement* adalah 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, dan 7%. Dalam penelitian ini menggunakan rasio tulangan

longitudinal 2,18% dan rasio volume transversal untuk kolom beban aksial rendah atau tinggi adalah 2,12% dan 3,2%.

Tabel 2.7 Hubungan tekanan lateral vs *drift*

Nama	Leleh	Beban puncak	Ultimit	Daktilitas
	<i>drift</i> , %	KN	<i>drift</i> , %	
CH10	0.62	2121	3.1	5
GH10	0.74	2136	3.06	4.1
GW10	0.77	2115	2.08	3.5
CH33	0.51	2752	3.4	6.7
GH33	0.52	2942	3.27	6.3
GW33	0.51	2749	3.03	6

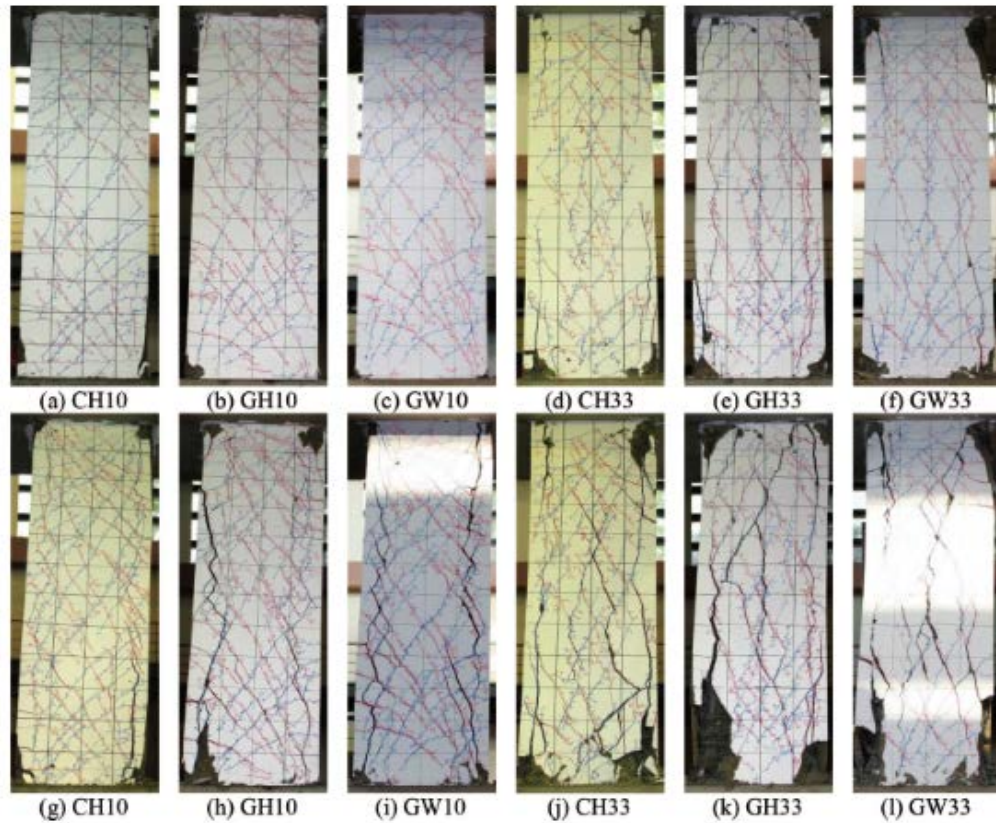
Sumber: Ou et al. (2015)



Gambar 2.14 Perilaku historis (a) CH10 (b) GH10 (c) GW10 (d) CH33 (e) GH33 (f) GW33 (Ou et al. 2015)

Pengujian *lateral displacement* pada kolom beton pracetak dengan sambungan *grouted coupler* menghasilkan hubungan tekanan lateral dengan *drift* yang terjadi yang disajikan pada Tabel 2.7 dan perilaku historis kolom pracetak sambungan *grouted coupler* akibat *beban lateral displacement* siklik disajikan pada Gambar 2.14. Dari Tabel 2.7 dan Gambar 2.14 menunjukkan bahwa daktilitas kolom monolit(CH10) lebih besar daripada daktilitas kolom pracetak dengan sambungan(GH10). Hal ini disebabkan oleh *yield drift* yang dihasilkan

kolom monolit(CH10) lebih rendah dibandingkan dengan kolom pracetak dengan sambungan(GH10). Gambar 2.15 menunjukkan kondisi kerusakan spesimen kolom akibat beban aksial dan *lateral displacement*.



Gambar 2.15 Kondisi Kerusakan pada 1,5% *nominal drift* (a) ke (f) dan 3% *nominal drift* (g) ke (l)Ou et al. (2015)

Dari perbandingan Gambar 2.15 (d) ke (f) dan (a) ke (c) menunjukkan bahwa retak geser badan terjadi lebih curam akibat peningkatan beban aksial ($0,33 A_g f'_c$) daripada yang terjadi pada beban aksial rendah ($0,1 A_g f'_c$). Ou et al. (2015) menyimpulkan "Hasil pengujian kolom menunjukkan regangan tarik maksimum pada sambungan tulangan adalah 0,013 dan 0,0034 dibawah beban aksial rendah dan tinggi yang masing-masing dibawah kapasitas uji sambungan *grouted coupler* yang dilakukan sebelumnya. Kolom pracetak dengan sambungan tersebut dan tulangan transversal dikait (GH10 dan GH33) menunjukkan kinerja seismik yang sebanding dengan hasil uji kolom monolit(CH10 dan CH33)".

2.5. Pemodelan Numerik Dan Experimental Program Kolom Beton Pracetak Sambungan *Grouted Coupler*

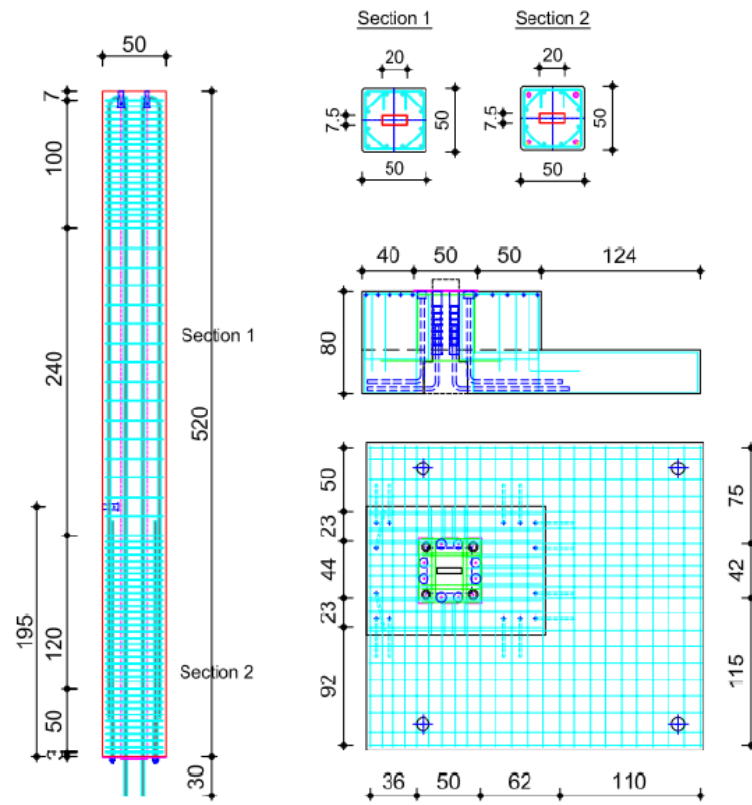
Sgambi et al. (2011) melakukan penelitian uji eksperimen dan numerik tentang perilaku sambungan khusus pada kolom pracetak. Sgambi et al. (2011) menganalisa sambungan perangkat *coupler* yang diisi mortar mutu tinggi untuk menghubungkan tulangan dengan penerapan beban siklik pada kolom yang dihubungkan dengan struktur pondasi. Investigasi dilakukan menggunakan ukuran kolom $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ dan tinggi 5 meter yang dibebani aksial secara konstan sebesar 400 KN dan diberikan siklus perpindahan horisotal sebesar 0,4% sampai 7% *drift*. Pada Tabel 2.8 disajikan hasil uji material yang dilakukan sebelum pengujian kolom pracetak.

Tabel 2.8 Data mutu material

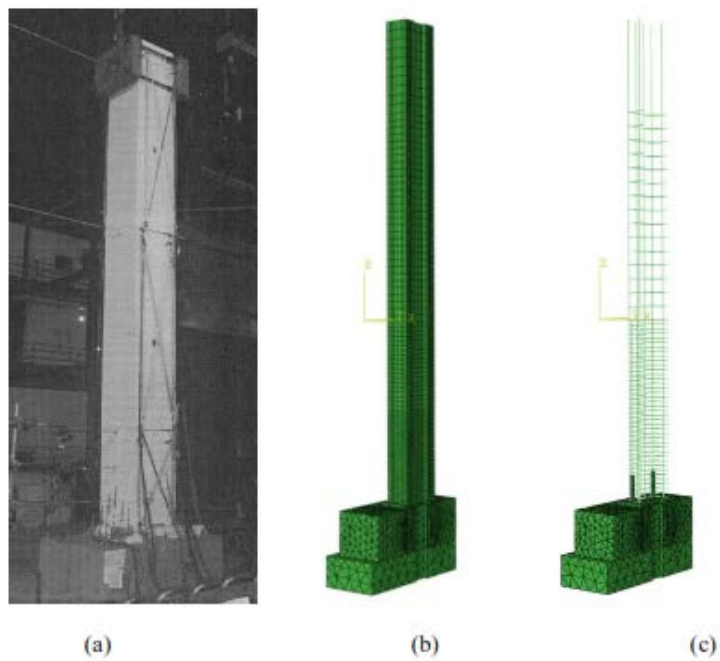
Material	Kuat tekan (MPa)	
Beton	64.2	
Mortar mutu tinggi	86	
	Tegangan leleh(MPa)	Tegangan ultimit(MPa)
Tulangan	450	540
Besi	335	600

Sumber: Sgambi et al. (2011)

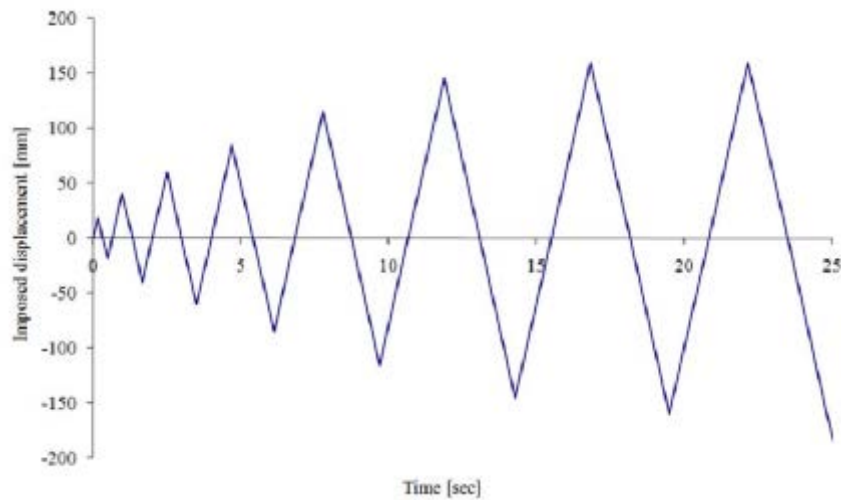
Kolom pracetak yang terhubung dengan struktur pondasi dimodelkan secara numerik dengan program bantu ABAQUS hanya setengah kolom berdasarkan anggapan lentur yang simetris seperti yang disajikan pada Gambar 2.16 (Sgambi et al. 2011). Geometri kolom pracetak dimodelkan dengan elemen hingga *hexahedral* dan struktur pondasi dimodelkan dengan elemen hingga *tetrahedral*. Elemen *truss* dipilih untuk memodelkan sengkang dan tulangan baja. Elemen *shell* dipilih untuk memodelkan sambungan. Hasil analisa pemodelan numerik didapatkan dari pembebanan *monotonic* dan *cyclic* yang dilakukan secara horisontal.



Gambar 2.16 Detail kolom dan pondasi (Sgambi et al. 2011)

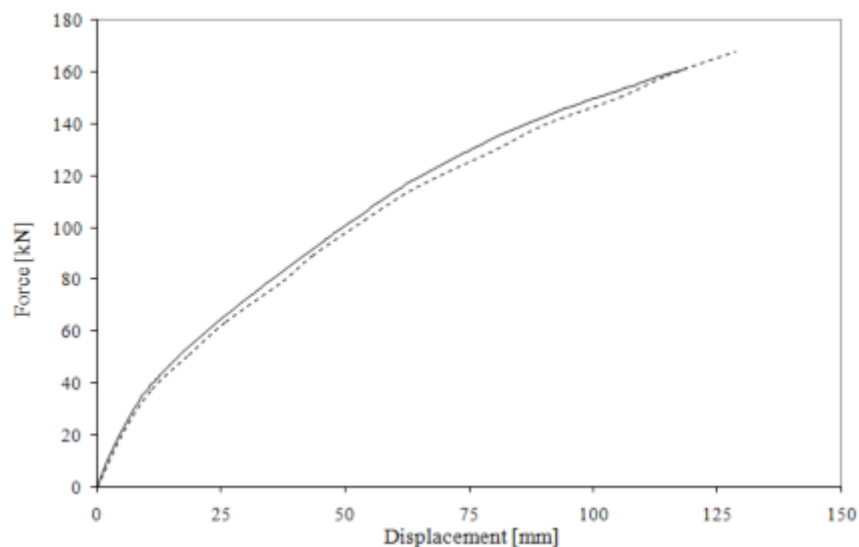


Gambar 2.17 Gambar kolom pracetak (a) model numerik kolom pracetak (b), dan detail tulangan longitudinal dan sengkang (c) (Sgambi et al. 2011)

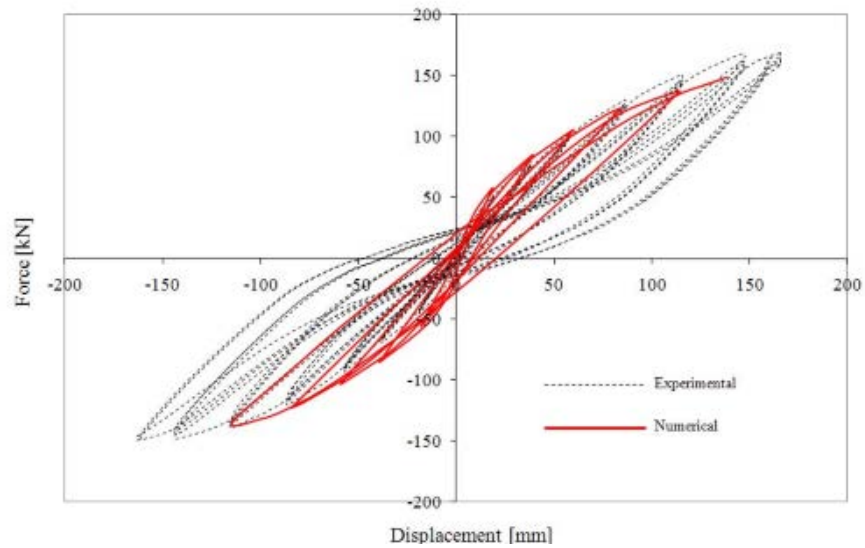


Gambar 2.18 Historis beban untuk analisis siklik(Sgambi et al. 2011)

Historis pembebanan *cyclic* pada pemodelan diberikan dari data eksperimental yang disajikan pada Gambar 2.18 (Sgambi et al. 2011). Dari hasil output pemodelan didapatkan hubungan tekanan horisontal terhadap *drift* yang terjadi akibat beban *monotonic* dan *cyclic* dibandingkan dengan hasil eksperimental dari Sgambi et al. (2011) yang disajikan pada Gambar 2.19 dan Gambar 2.20.

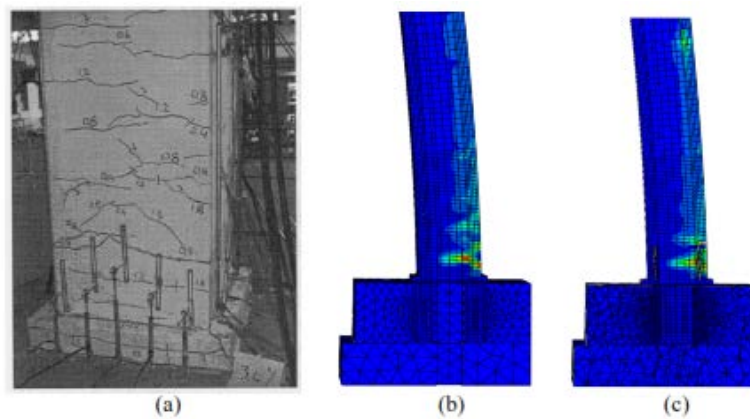


Gambar 2.19 Perbandingan kurva perpindahan atas terhadap gaya geser dasar antara hasil eksperimental (garis titik) dan model numerik akibat beban *monotonic*(Sgambi et al. 2011)



Gambar 2.20 Perbandingan kurva perpindahan atas terhadap gaya geser dasar akibat beban siklik (Sgambi et al. 2011)

Dari Gambar 2.19 menunjukkan bahwa deformabilitas dan kekuatan *ultimate* mampu memberikan respon yang sangat baik pada pemodelan numerik. Gambar 2.20 menunjukkan pada historis pembebanan lima siklus pertama mempunyai kesesuaian yang baik dengan hasil eksperimental (Sgambi et al. 2011). Kondisi dasar kolom setelah percobaan ditunjukkan pada Gambar 2.21 (a). Area paling rusak berdasarkan akhir analisis numerik ditunjukkan pada Gambar 2.21 (b) dan Gambar 2.21 (c). Dari Gambar 2.21 ditunjukkan bahwa retakan besar di kolom dipicu oleh posisi dari sambungan.



Gambar 2.21 Retakan setelah eksperimen(a), retakan dari hasil analisis numerik pada potongan tengah(b), dan potongan tulangan longitudinal(c)

2.6. Constitutive material equation

Razvi and Saatcioglu (1999) mendekati persamaan hubungan tegangan-regangan beton mutu tinggi. Kekuatan beton yang terkekang dapat ditentukan dengan persamaan 2.1 berdasarkan model kekangan yang diusulkan oleh Razvi and Saatcioglu (1999). Dimana f_{le} adalah tekanan lateral seragam.

$$f'_{co} = f'_{cc} + k_1 f_{le} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$k_1 = 6,7(f_{le})^{-17} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \dots\dots\dots (2.3)$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^q (A_s f_s \sin \alpha)}{s b_c} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$k_2 = 0,15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right)} \leq 1.0 \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

f_l = Tekanan lateral rata-rata

f_s = Tegangan tulangan transversal saat tegangan beton puncak

q = Jumlah kaki sengkang yang melintasi inti beton

Attard and Setunge (1996) mendekati hubungan tegangan regangan uniaxial dengan menggunakan formulasi matematika nondimensional. Konstanta kurva ascending dan descending didekati dengan persamaan 2.7 dan 2.8.

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

Persamaan konstanta kurva ascending disajikan sebagai berikut:

$$A = \frac{E_{ti} \varepsilon_o}{f_o}$$

$$B = \frac{(A-1)^2}{\alpha(1-\frac{f_{pl}}{f_o})} + \frac{A^2(1-\alpha)}{\alpha^2\frac{f_{pl}}{f_o}(1-\frac{f_{pl}}{f_o})} - 1$$

$$C = (A - 2)$$

$$D = (B + 1) \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

$$f_{pl} = 0,45 f_c$$

E_c = Secant modulus diukur pada tegangan f_{pl}

E_{ti} = Initila tangent modulus pada tegangan nol

Persamaan konstanta kurva descending disajikan sebagai berikut:

$$A = \frac{f_{ic}(\varepsilon_{ic} - \varepsilon_c)^2}{\varepsilon_c \varepsilon_{ic} (f_c - f_{ic})}$$

$$B = 0$$

$$C = A - 2$$

$$D = 1 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

f_{ic}, ε_{ic} = Koordinat titik infleksi

Hubungan tegangan-regangan tarik pada beton dapat didekati dengan persamaan yang diturunkan oleh Hsu and Zhang (1996) sebagai berikut:

$$\sigma_r = E_c \varepsilon_r \text{ untuk } \varepsilon_r \leq \varepsilon_{cr} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\sigma_r = f_{cr} (\varepsilon_{cr} / \varepsilon_r)^{0.4} \text{ untuk } \varepsilon_r > \varepsilon_{cr} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana:

E_c = Modulus Young beton

f_{cr} = Kuat tarik beton

ε_r = Regangan tarik beton

ϵ_{cr} = Regangan tarik beton pada saat mulai retak

Dhakai and Maekawa (2002). mendekati hubungan tegangan-regangan pada baja mutu tinggi dengan persamaan Mander (1983). Tegangan *envelope* tulangan mencapai titik *strain-hardening* dapat diselesaikan dengan hubungan tegangan-regangan *uniaxial* dibawah ini.

$$\sigma_{st} = E_s \epsilon_{st} \text{ untuk } \epsilon_{st} \leq \epsilon_y \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\sigma_{st} = f_y \text{ untuk } \epsilon_y < \epsilon_{st} \leq \epsilon_{sh} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

E_s = Modulus Young

f_y = Kuat tarik leleh

ϵ_y = Regangan tarik leleh

ϵ_{sh} = Regangan pada titik awal *hardening*

Persamaan berikut untuk mengidealkan *strain-hardening non linear* yang diusulkan oleh Mander (1983) dalam Dhakai and Maekawa (2002).

$$\sigma_{st} = f_u + (f_y - f_u) (\epsilon_u - \epsilon_{st} / \epsilon_u - \epsilon_{sh})^P \text{ untuk } \epsilon_{sh} < \epsilon_{st} \leq \epsilon_u \dots\dots\dots (2.13)$$

dan

$$P = E_s (\epsilon_u - \epsilon_{sh} / f_u - f_y) \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

f_u = Kuat tarik ultimit

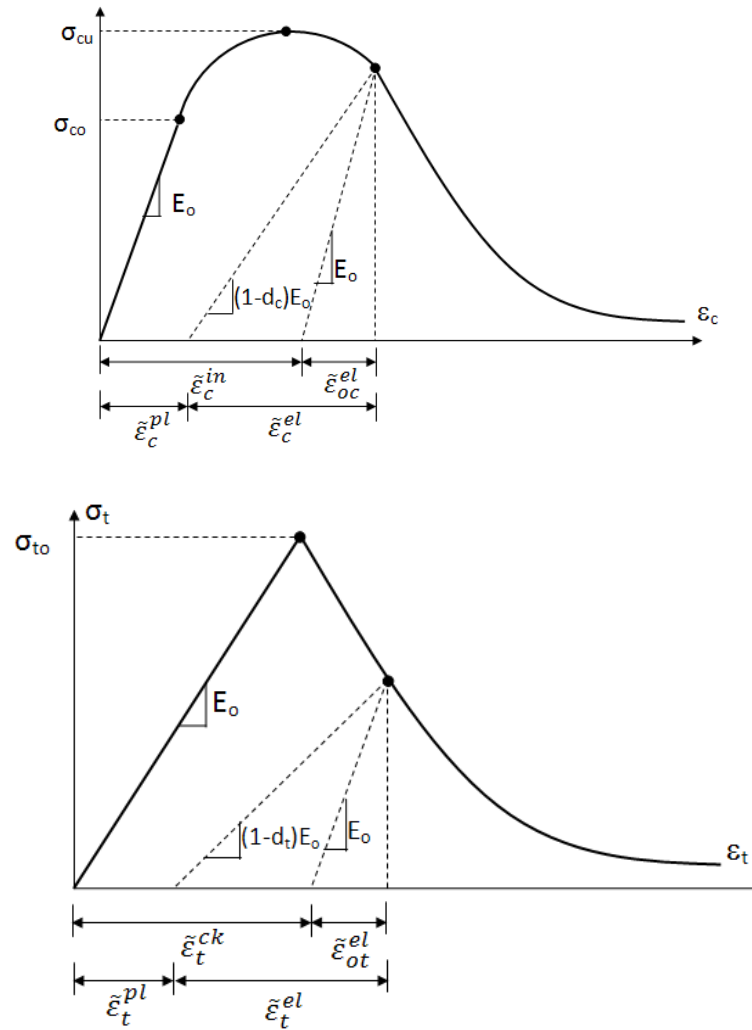
ϵ_u = Regangan tarik ultimit

P = Parameter yang menggambarkan bentuk kurva *hardening*

2.7. Concrete damage plasticity

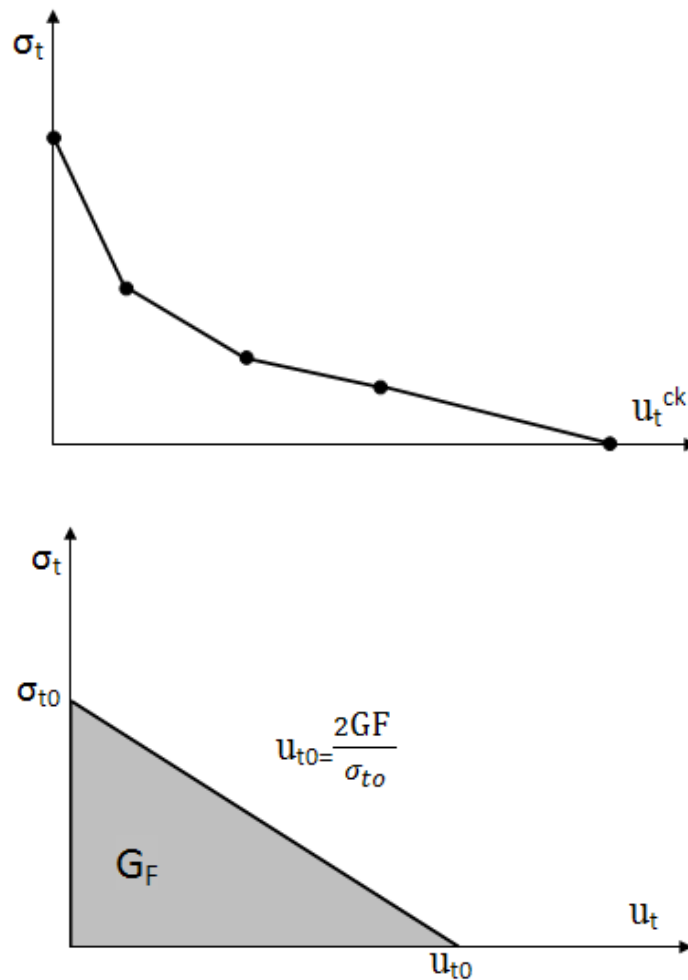
Perilaku konstitutif beton pada Abaqus didefinisikan perilaku elastic dan Concrete Damage Plasticity (CDP) baik tekan maupun tarik beton. Nilai tegangan tarik beton adalah $f_t = 0,62 \sqrt{f'_c}$ yang didefinisikan berdasarkan ACI 318M

2014. *Fracture energy* (G_f) pada tekan beton dihitung dari luas trapesium setiap pias didalam kurva tegangan-regangan beton pada Gambar 2.22 terhadap sumbu x dan y *fracture energy*. Regangan elastis didefinisikan tegangan dibagi modulus elastis.



Gambar 2.22 Perilaku beton dengan gaya axial tekan dan tarik

Gambar 2.22 menunjukkan bahwa regangan plastis didapatkan dari hasil pengurangan regangan beton terhadap regangan elastis. Dari luas trapesium tegangan beton terhadap regangan plastis didapatkan *Fracture energy* (G_f). Damage parameter beton didapatkan dari pembagian akumulatif *Fracture energy* (G_f) terhadap total *Fracture energy* (G_f).



Gambar 2.23 Hubungan tegangan-regangan dengan pendekatan *fracture energy*

Abaqus menghitung regangan plastis menggunakan persamaan 2.8.

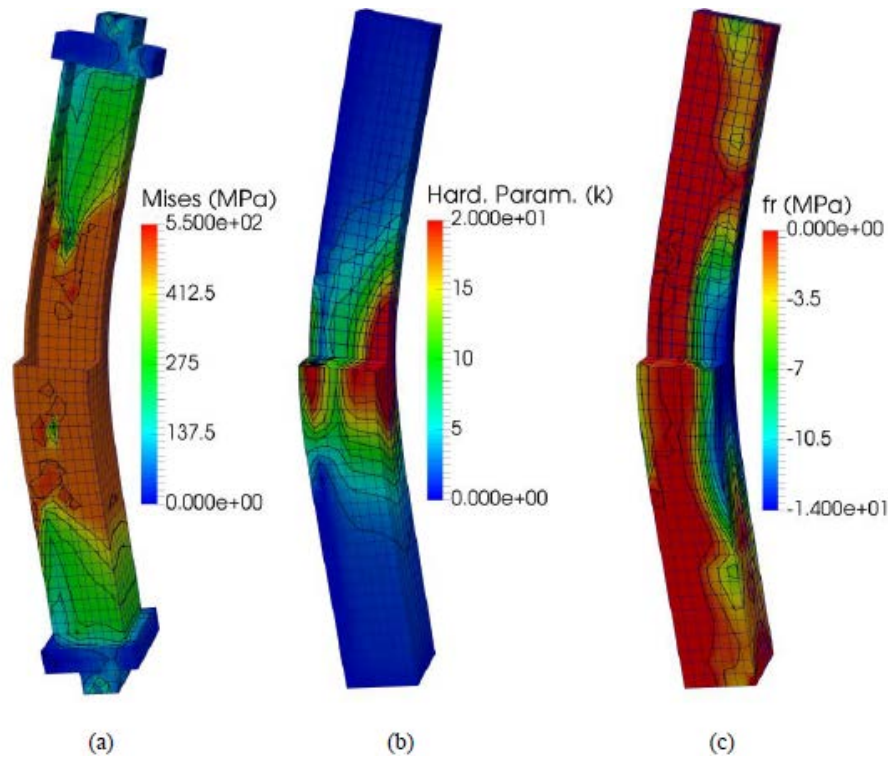
$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{(1-d_c)E_0} \dots\dots\dots (2.15)$$

Parameter plastisitas yang direkomendasikan oleh Abaqus adalah eksentrisitas aliran potensial $\varepsilon=0.1$, rasio kekuatan tekan biaxial/uniaxial $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}=1.16$, dan rasio invarian tegangan deviatorik $K= 0,667$. Sudut dilatasi dan viskositas diasumsikan agar sesuai dengan hasil eksperimental $\psi=40\%$ dan $v=0.001$.

2.8. Pemodelan Numerik Menggunakan Software *Finite Element*

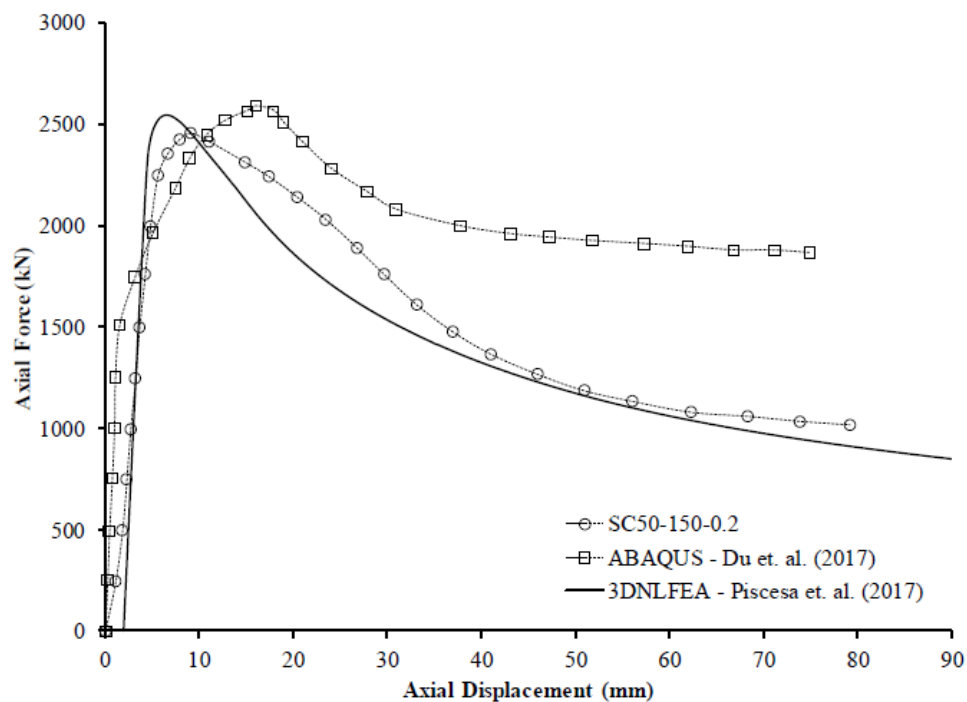
Piscesa et al. (2017) melakukan investigasi numerik pada perilaku kolom *Concrete-Steel-filled-Tube* (CSFT) dengan beban eksentris. Investigasi numerik

tersebut menggunakan elemen hingga non linier 3D dengan program *in-house* 3D-NLFEA yang dikembangkan oleh Piscesa et al. (2017) dan ABAQUS. Pada penelitian ini ada dua model yang diinvestigasi, yaitu SC50-150-0.2 and SC50-150-0.4. Data geometri dan material dari kedua model tersebut diambil dari penelitian Du et.al (2017).



Gambar 2.24 *Deformed shape* elemen SC50-150-0.2 (a) *Von-Mises stress of the steel tube*, (b) *Hardening parameter of the concrete core* and (c) *Confining pressure of the concrete core* (Piscesa et al. 2017)

Program 3D-NLFEA menganalisis model SC50-150-0.2 menghasilkan deformed shape dengan *Von-Mises stress of the steel tube*, *hardening parameters* dan *confining pressures of the concrete core* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.24. Dari pembebanan eksentris pada model menghasilkan kurva axial force terhadap eksentrisitas tambahan pada tengah bentang, yang ditunjukkan pada Gambar 2.25. Dalam Gambar 2.25 terdapat kurva yang dihasilkan oleh program 3D-NLFEA dibandingkan dengan hasil dari program ABAQUS dengan menggunakan *Concrete-Damage-Plasticity-Model* (CDPM) yang terdapat didalam ABAQUS dan hasil eksperimental dari model SC50-150-0.2.



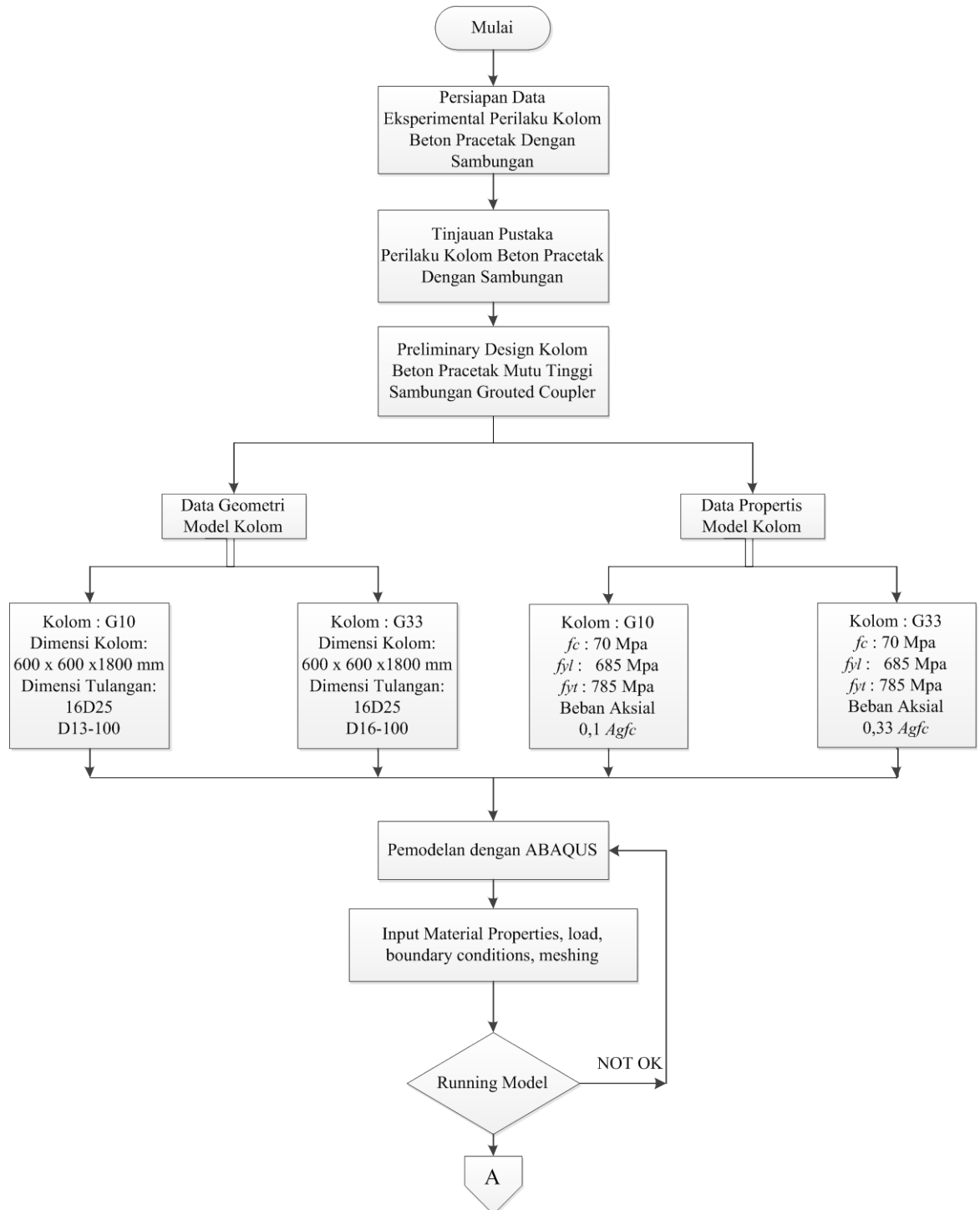
Gambar 2.25 Perbandingan axial load vs axial displacement diantara hasil eksperimental SC50-150-0.2, 3D-NLFEA dan CDPM in ABAQUS

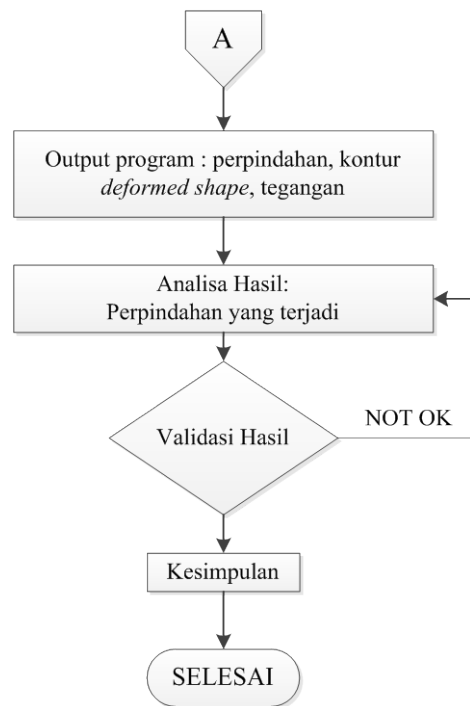
Hasil anaisis pemodelan dengan menggunakan 3D-NLFEA menunjukkan hasil yang mirip dengan hasil eksperimental seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.25. Respon softening dan tegangan puncak menunjukkan keakuratan yang baik. Berbeda dengan hasil dari program ABAQUS yang menunjukkan prediksi beban puncak aksial yang lebih tinggi daripada prediksi program 3D-NLFEA dan perilaku softening yang lebih kaku dibandingkan dengan hasil eksperimental.

BAB 3

METODOLOGI

3.1. Diagram Alir





Gambar 3.1 Diagram Alir Pemodelan

Metode penelitian dilakukan dengan persiapan data dari eksperimental Ou et al. (2015) mengenai perilaku kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan grouted coupler kemudian dilakukan preliminary design. Data-data geometri dan properti dari eksperimental Ou, Alrasyid et al. (2015) diambil untuk input kedalam pemodelan. Pemodelan dilakukan menggunakan program ABAQUS kemudian dilakukan running program. Hasil output running program akan diverifikasi dengan hasil eksperimental yang dilakukan Ou, Alrasyid et al. (2015).

3.2. Persiapan Data

Persiapan data adalah tahap dimana pengambilan data-data dari penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan studi yang dilakukan. Data-data tersebut dapat bersumber dari standar peraturan yang berkaitan, laporan penelitian, jurnal, atau seminar makalah. Data mutu yang diambil untuk input pemodelan sesuai dengan hasil aktual pengujian tekan beton, tarik tulangan, dan tarik sambungan *grouted sleeves coupler* pada eksperimental yang dilakukan Ou, Alrasyid et al. (2015).

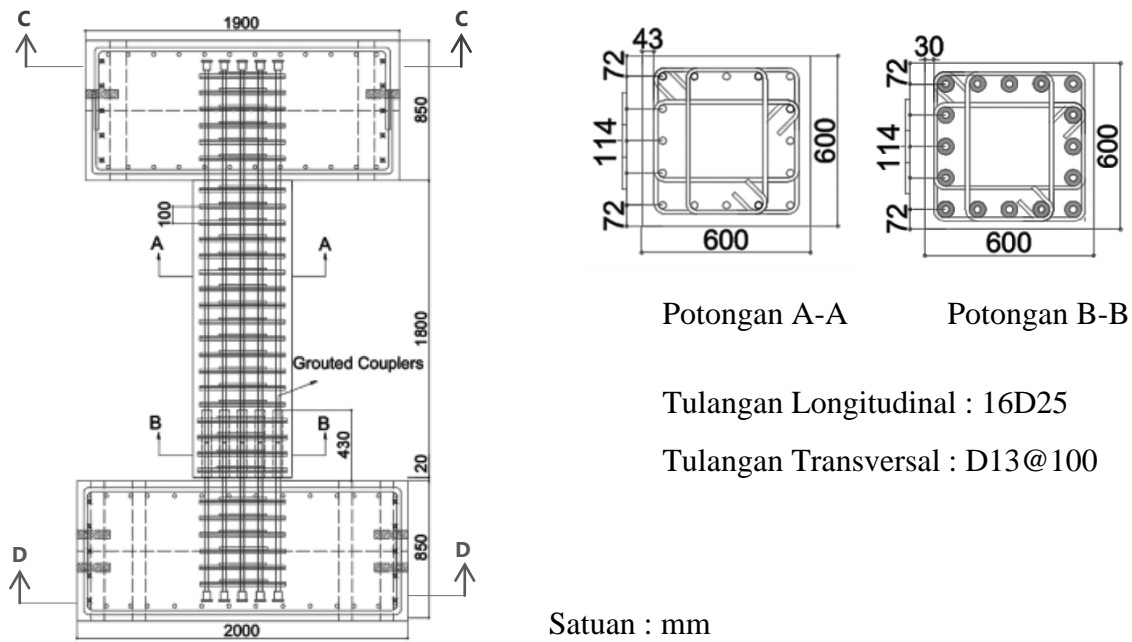
Data geometri kolom beton pracetak diambil dari data geometri kolom GH10 dan GH33 pada eksperimental yang dilakukan Ou, Alrasyid et al. (2015).

3.3. Tinjauan Pustaka

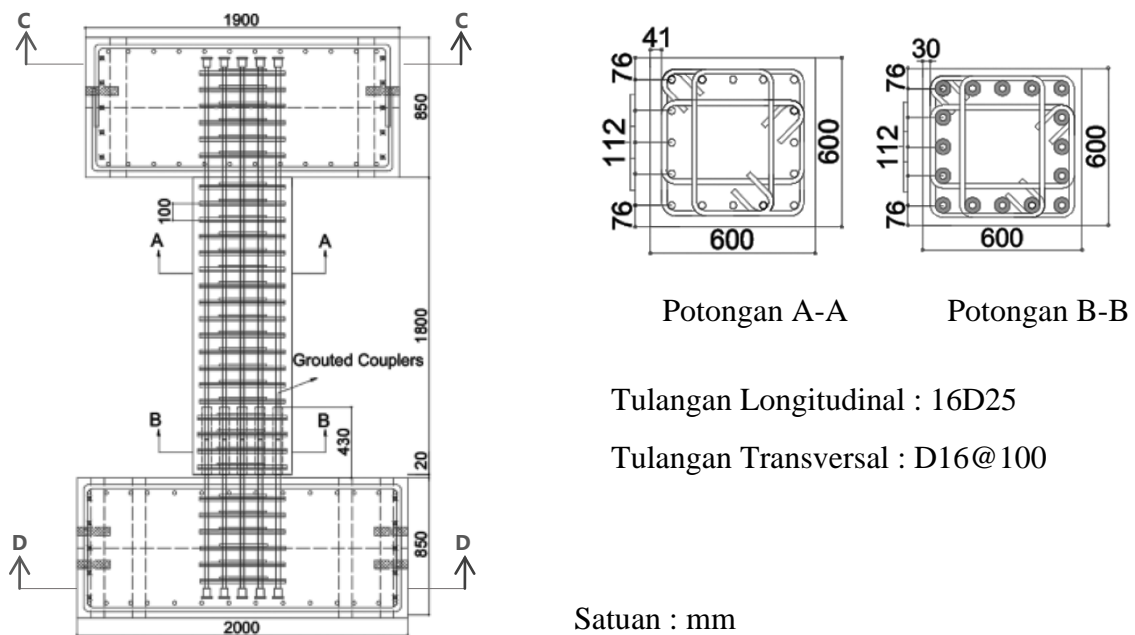
Setelah pengambilan data dari penelitian sebelumnya maka akan dilakukan tinjauan pustaka dari sumber-sumber yang berkaitan dengan pembahasan tesis tersebut. Referensi yang diambil khususnya adalah jurnal mengenai kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan *grouted sleeve coupler*.

3.4. Preliminary Design

Preliminary Design dilakukan untuk menentukan data properti dan geometri yang diperlukan dalam pemodelan kolom. Data properti dan geometri dari kolom beton pracetak mutu tinggi yang diambil dalam penelitian ini adalah data penelitian eksperimental yang dilakukan Ou, Alrasyid et al. (2015) mengenai perilaku siklik pada kolom pracetak mutu tinggi. Spesimen yang akan dimodelkan terdiri dari dua spesimen, yaitu kolom G10 dan G33 yang diambil dari data penelitian eksperimental Ou, Alrasyid et al. (2015). Huruf "C" menotasikan kolom beton monolit mutu tinggi sedangkan huruf "G" menotasikan kolom beton pracetak mutu tinggi sambungan *grouted sleeve coupler*. Angka "10" dan "33" menotasikan beban aksial $0,1A_gf'_c$ dan $0,33A_gf'_c$. Spesimen dengan beban aksial $0,1A_gf'_c$ mewakili struktur kolom pracetak dengan beban aksial yang rendah (*low axial*) dan spesimen dengan beban aksial $0,33A_gf'_c$ mewakili struktur kolom pracetak dengan beban aksial yang tinggi (*high axial*).

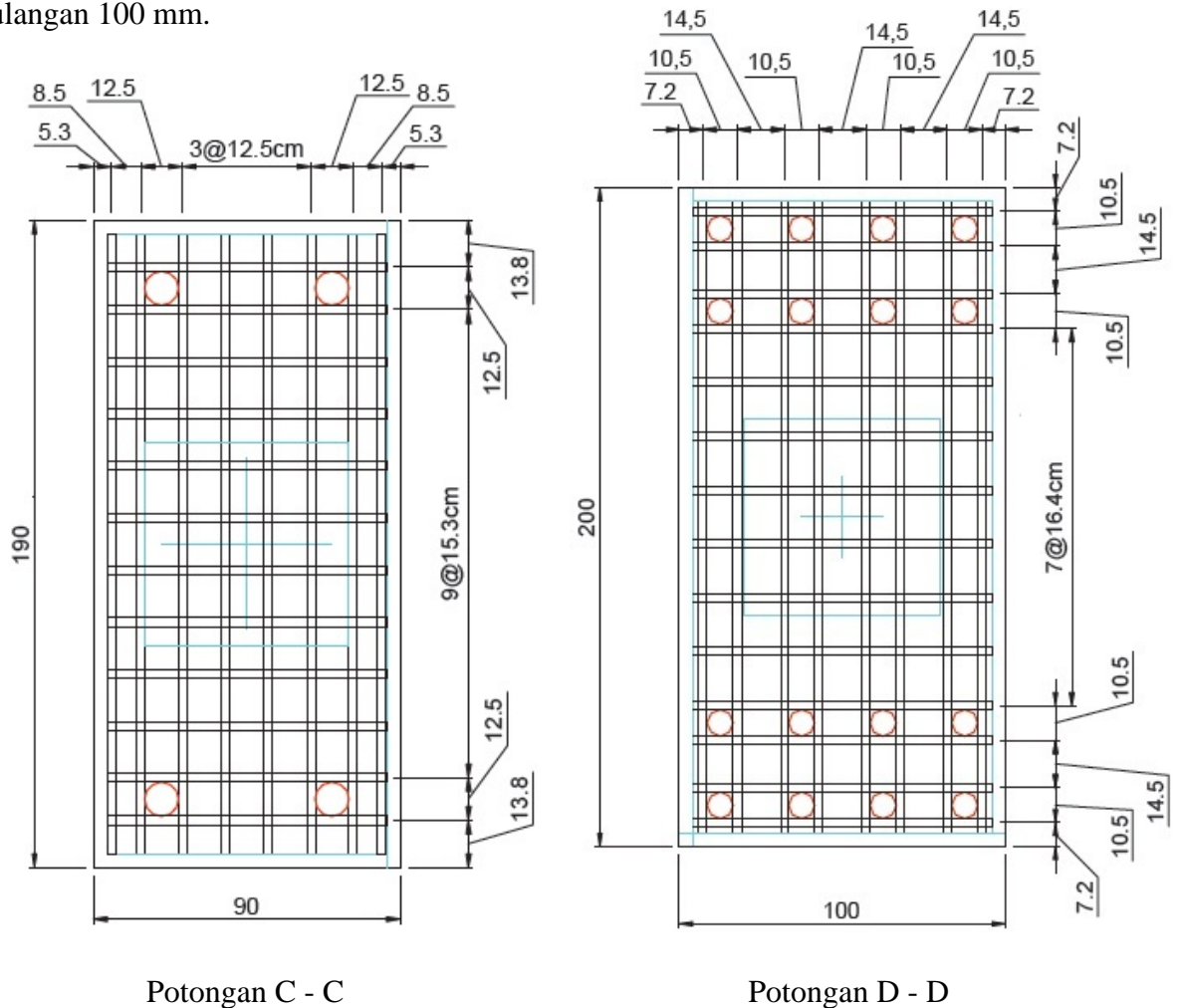


Gambar 3.2 Penulangan dan detail potongan melintang kolom G10 (Ou et al. 2015)



Gambar 3.3 Penulangan dan detail potongan melintang kolom G33 (Ou et al. 2015)

G10 didesain dengan tulangan longitudinal diameter 25 mm berjumlah 16 buah dan tulangan transversal diameter 13 mm dengan jarak spasi antar tulangan 100 mm. G33 didesain dengan tulangan longitudinal diameter 25 mm berjumlah 16 buah dan tulangan transversal diameter 16 mm dengan jarak spasi antar tulangan 100 mm.



Gambar 3.4 Detail blok beton atas dan bawah (Ou et al. 2015)

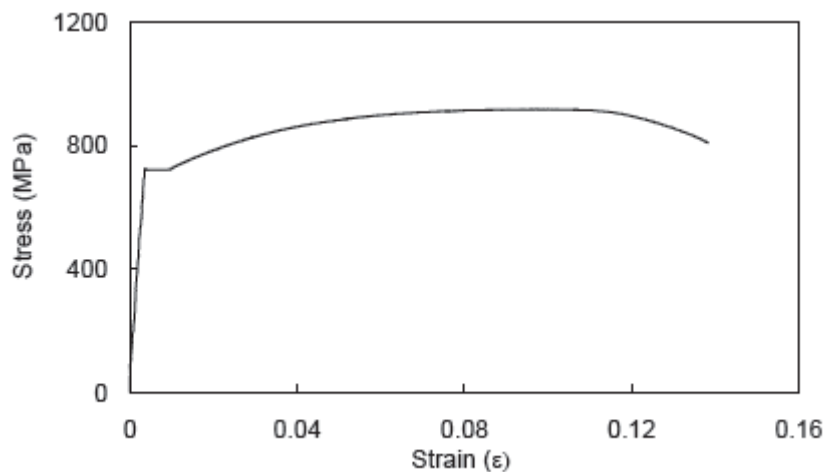
Semua kolom mempunyai rasio tulangan longitudinal 2,18% sedangkan rasio tulangan transversal kolom untuk beban aksial $0,1A_g f'_c$ dan $0,33A_g f'_c$ adalah 2,12% dan 3,2%. Gambar spesimen kolom beton pracetak mutu tinggi yang akan dimodelkan disajikan dalam Gambar 3.2. Dari Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 disajikan detail kolom beton pracetak mutu tinggi sambungan *grouted sleeve coupler* dengan luas penampang semua kolom 600x600 mm dan tinggi kolom 1800 mm.

Tabel 3.1 Properti tarik SD685 dan SD785 dari Taiwan

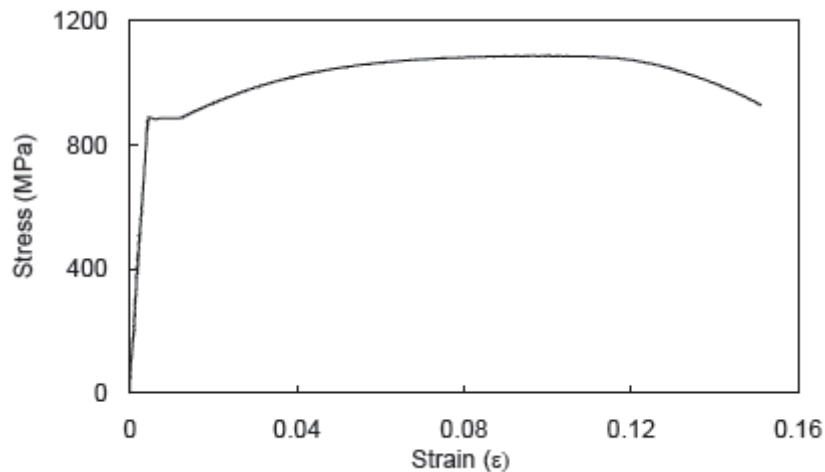
Kelas	SD685	SD785
Kuat leleh, MPa	685-785	≥ 785
Kuat tarik, min MPa	860	930
Regangan leleh, min %	1.4	-
Perpanjaangan total, min %	10	8
Rasio kuat leleh - tarik min	1.25	-

Sumber: Alrasyid (2015)

Tulangan longitudinal dan transversal kolom dipasang dengan baja mutu tinggi SD685 dan SD785 dengan mutu aktual berdasarkan hasil pengujian kuat tarik aktual yang dilakukan Ou et al. (2015). Pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6 disajikan hubungan tegangan-regangan tulangan longitudinal D25 dan transversal D13 dari hasil eksperimental Alrasyid (2015).



Gambar 3.5 Hubungan tegangan-regangan tulangan longitudinal D25 SD685 (Alrasyid 2015)



Gambar 3.6 Hubungan tegangan-regangan tulangan transversal D13 SD785
Alrasyid (2015)

Untuk kekuatan tekan beton yang digunakan sama untuk semua spesimen kolom, yaitu 70 MPa dengan mutu aktual berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton aktual yang dilakukan Ou et al. (2015). Elemen *bonding* pada *grouted sleeve coupler* adalah *cementitious grout* mutu tinggi dengan kuat tekan 120 MPa yang dipompa dari *port inlet* pada bagian kolom bawah sampai mengalir pada *port outlet*.

Tabel 3.2 Parameter desain kolom

Nama	Beton	Tulangan Longitudinal (SD685)				Tulangan Transversal(SD785)				
	f_c Mpa	Ukuran	ρ %	f_{yl} Mpa	f_{ul} Mpa	Ukuran	s, mm	ρ %	f_{yt} Mpa	f_{ut} Mpa
G10	74	16 D25	2.18	713	932	D13	100	2	886	1095
G33	77					D16			836	1020

Sumber: Ou et al. (2015)

Hasil pengujian tarik aktual dari tulangan longitudinal SD685 dan tulangan transversal SD785 disajikan pada Tabel 3.2. Hubungan tegangan-regangan pada baja mutu tinggi dapat didekati dengan persamaan Mander (1983)dalam Dhakal and Maekawa (2002). Tegangan *envelope* tulangan mencapai titik *strain-hardening* dapat diselesaikan dengan hubungan tegangan-regangan *uniaxial* dibawah ini.

$$\sigma_{st} = E_s \varepsilon_{st} \text{ untuk } \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_y \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\sigma_{st} = f_y \text{ untuk } \varepsilon_y < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{sh} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana:

E_s = Modulus Young

f_y = Kuat tarik leleh

ε_y = Regangan tarik leleh

ε_{sh} = Regangan pada titik awal *hardening*

Persamaan berikut untuk mengidealkan *strain-hardening non linear* yang diusulkan oleh Mander (1983) dalam Dhakal and Maekawa (2002).

$$\sigma_{st} = f_u + (f_y - f_u) (\varepsilon_u - \varepsilon_{st} / \varepsilon_u - \varepsilon_{sh})^P \text{ untuk } \varepsilon_{sh} < \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_u \dots\dots\dots (3.3)$$

dan

$$P = E_{sh} (\varepsilon_u - \varepsilon_{sh} / f_u - f_y) \dots\dots\dots (3.4)$$

Dimana:

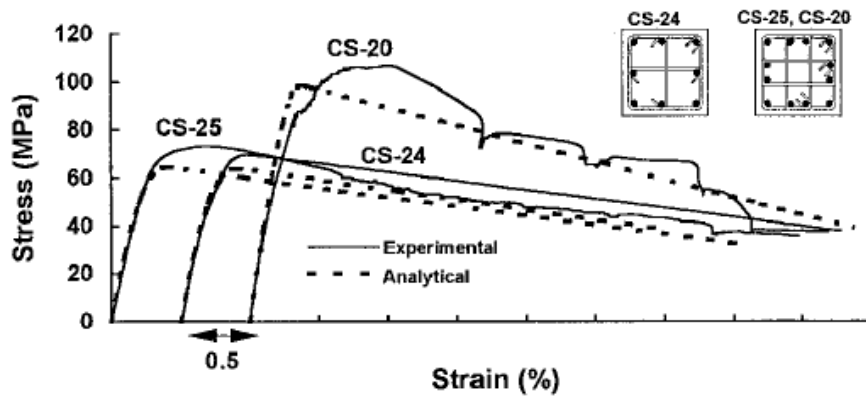
f_u = Kuat tarik ultimit

ε_u = Regangan tarik ultimit

P = Parameter yang menggambarkan bentuk kurva *hardening*

Rodriguez et al. (1999) dalam Dhakal and Maekawa (2002), mengusulkan suatu persamaan untuk menghindari ketidakpastian dalam memperkirakan E_{sh} . Rodriguez et al. (1999) dalam Dhakal and Maekawa (2002) mengevaluasi nilai P dengan menentukan titik tertentu pada kurva *strain hardening*.

$$P = \text{Log} (f_u - f_{s1h} / f_u - f_y) / \text{Log} (\varepsilon_u - \varepsilon_{s1h} / \varepsilon_u - \varepsilon_y) \dots\dots\dots (3.5)$$



Gambar 3.7 Hubungan tegangan-regangan kolom persegi mutu tinggi yang diuji oleh Saatcioglu dan Razvi(1996) dalamRazvi and Saatcioglu (1999)

Kuat tekan aktual beton disajikan pada Tabel 3.2. Hubungan tegangan-regangan beton mutu tinggi dapat didekati dengan persamaaRazvi and Saatcioglu (1999). Kekuatan beton yang terkekang dapat ditentukan dengan persamaan 3.6 berdasarkan model kekangan yang diusulkan oleh Razvi and Saatcioglu (1999). Dimana f_{le} adalah tekanan lateral seragam.

$$f'_{co} = f'_{cc} + k_1 f_{le} \dots\dots\dots (3.6)$$

$$k_1 = 6,7(f_{le})^{-17} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \dots\dots\dots (3.8)$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^q (A_s f_s \sin \alpha)}{s b_c} \dots\dots\dots (3.9)$$

$$k_2 = 0,15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right)} \leq 1.0 \dots\dots\dots (3.10)$$

Dimana:

f_l = Tekanan lateral rata-rata

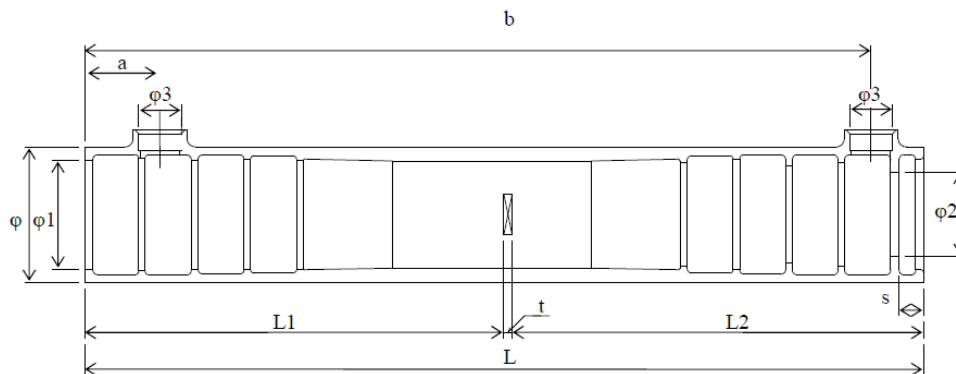
f_s = Tegangan tulangan transversal saat tegangan beton puncak

q = Jumlah kaki sengkang yang melintasi inti beton

Tabel 3.3 Parameter desain *grouted coupler*

Model	Ukuran tulangan (mm)	L	ϕ	$\phi 1$	$\phi 2$	A	b	$\phi 3$	s	L1	L2	Volume injeksi mortar (kg)
7R-DS	22	270	53	44	28	46	238	26	15	135	130	0.81
8R-DS	25	300	58	48	32	46	268	26	15	150	145	0.99
9R-DS	28	340	63	51	36	46	308	26	15	170	165	1.25

Sumber: Tokyo Tekko, 2005



Gambar 3.8 Detail desain *grouted coupler* (Tokyo Tekko, 2005)

Dari Tabel 3.3 dan Gambar 3.8 disajikan detail ukuran sambungan *grouted sleeve coupler* yang digunakan pada pemodelan berdasarkan produksi Tokyo Tekko Co., Ltd dengan model 8R-DS.

Tabel 3.4 Hasil uji sambungan *grouted coupler*-tulangan ulir terhadap beban monoton

No. Benda Uji	f_{ua} , MPa	f_{ua}/f_{ys}	δ_{slip} , mm	e_a
	$\geq f_{us}$ (860)	≥ 1.25	≤ 0.3	≥ 0.4
1	900	1.31	0.108	NA
2	900	1.31	0.077	NA
3	895	1.31	0.11	NA
Rata-rata	898	1.31	0.098	NA

Sumber: Ou dkk, 2015

Tabel 3.5 Hasil uji sambungan *grouted coupler*-tulangan ulir terhadap beban siklik

No. Benda Uji	f_{ua} , MPa	f_{ua}/f_{ys}	$\delta_{slip20c}$, mm	$\delta_{slip24c}$, mm	$\delta_{slip28c}$, mm
	$\geq f_{us}$ (860)	≥ 1.25	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.9

1	881	1.29	0.127	0.163	0.274
2	868	1.27	0.175	0.145	0.465
3	885	1.29	0.196	0.152	0.376
Rata-rata	878	1.28	0.166	0.153	0.372

Sumber: Ou et al. (2015)

Dari Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 disajikan mutu material dan mekanisme kegagalan *bonding* pada sambungan *grouted sleeve coupler* terhadap tulangan ulir yang akan digunakan pada pemodelan dengan slip rata-rata 0,098 berdasarkan hasil pengujian beban monoton dan variasi slip berdasarkan hasil pengujian beban siklik aktual yang dilakukan Ou et al. (2015). Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 menunjukkan 6 spesimen sambungan *grouted coupler* dengan tulangan longitudinal diuji tarik secara siklik dan monotonik. Dari hasil uji tersebut dihasilkan bahwa *grouted coupler* memenuhi syarat $1,25 f_y$ lebih besar dari kuat leleh tulangan longitudinal berdasarkan persyaratan SNI 2847: 2013 Pasal 12.14.3.2 " Suatu sambungan mekanis penuh harus mengembangkan tarik atau tekan, seperti disyaratkan, paling sedikit $1,25f_y$ batang tulangan."

3.5. Pemodelan Kolom Beton Pracetak Mutu Tinggi Sambungan Grouted Sleeve Coupler dengan Program ABAQUS

Pada tahap ini dilakukan pemodelan kolom beton pracetak mutu tinggi sambungan *grouted sleeve coupler* dengan menggunakan software ABAQUS. Data - data properti dan geometri kolom diinput ke dalam software ABAQUS.

Pemodelan *finite elemen* menggunakan software ABAQUS dilakukan dengan tahapan-tahapan tertentu antara lain:

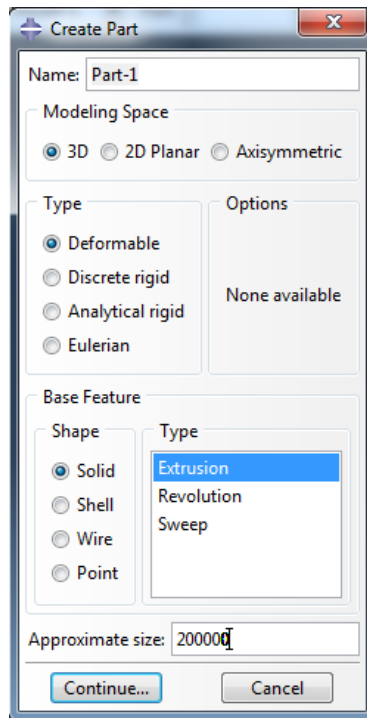
1. Preprocessing

Data geometri dan data material seperti ukuran, kuat leleh, dan beban dari pemodelan ditetapkan dan diinput pada tahap ini. Beberapa langkah yang dilakukan dalam tahap ini antara lain:

a. Penetapan geometri model

Langkah pertama dalam pemodelan menggunakan ABAQUS adalah menentukan sistem satuan dan sketsa model yang akan dimodelkan. Satuan dalam pemodelan kolom pracetak menggunakan program ABAQUS ditentukan dalam N/mm. Pemodelan *part* beton menggunakan *elemsolid hexahedral* disebut C3D8R pada ABAQUS sedangkan tulangan longitudinal, copler, dan sengkang menggunakan elemen *truss* yang disebut T3D2(3D 2 node linear displacement) untuk tulangan polos dan elemen solid untuk tulngan ulir pada ABAQUS 6.14. Ikatan antara beton dan tulangan didekati sebagai ikatan *full bonded* yang didefinisikan ABAQUS dengan *embeded* pada *constraint*. ABAQUS 6.14 menggunakan elemen isoparametrik *brick* 8 node untuk kasus tiga dimensi. Interpolasi isoparametrik didefinisikan dalam koordinat elemen g,h, dan r. Fungsi interpolasi isoparametrik *first-order brick* disajikan pada persamaan 3.11 dibawah ini.

$$\begin{aligned}
 u = & \frac{1}{8}(1-g)(1-h)(1-r)u_1 + \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1-r)u_2 + \frac{1}{8}(1-g) \\
 & (1-h)(1-r)u_3 + \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1-r)u_4 + \frac{1}{8}(1-g)(1-h) \\
 & (1-r)u_5 + \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1-r)u_6 + \frac{1}{8}(1-g)(1-h)(1-r) \\
 & u_7 + \frac{1}{8}(1+g)(1-h)(1-r)u_8 \dots\dots\dots (3.11)
 \end{aligned}$$



Gambar 3.9 Input data geometri pada ABAQUS

Pada ABAQUS 6.14 teori pendekatan yang paling sederhana digunakan pada pemodelan balok solid adalah asumsi Euler-Bernoulli. Pendekatan Euler-Bernoulli digunakan untuk balok untuk regangan aksial dan rotasi yang besar. Tingkat kerja internal virtual yang terkait dengan tegangan aksial disajikan pada persamaan 3.12.

$$\delta W_1^I = \int_{L^f} \int_A \sigma^f \delta \varepsilon^f dA dL^f \dots\dots\dots(3.12)$$

Dimana:

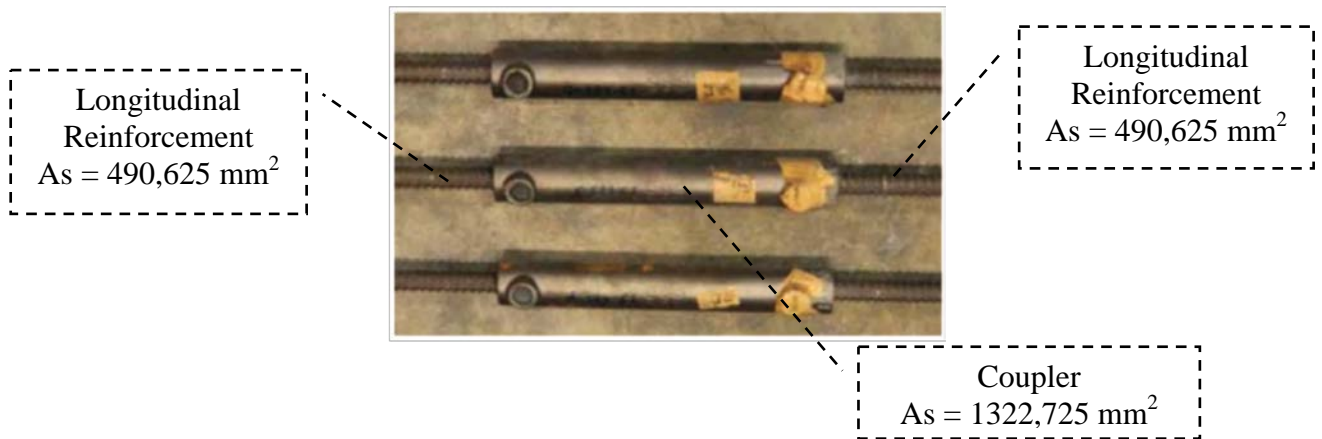
σ^f = Tegangan material

$\delta \varepsilon^f$ = Regangan material

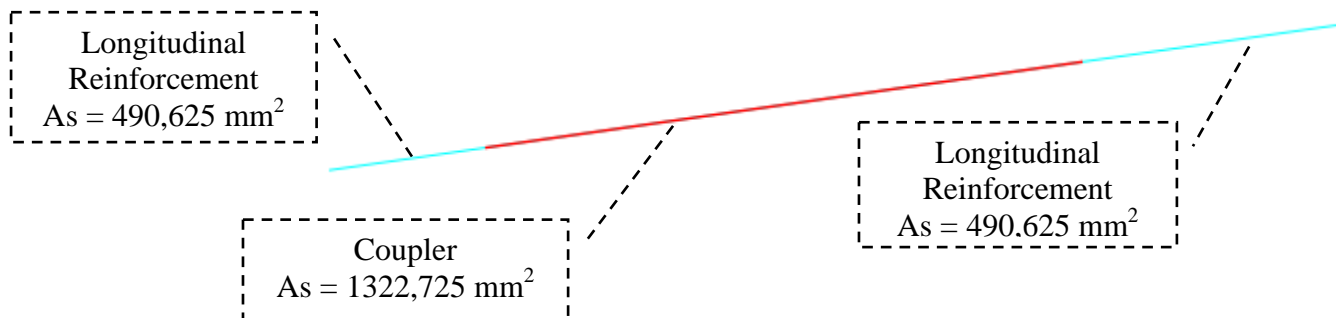
L^f = Panjang serat

Pemodelan *part coupler* didekati dengan elemen truss (T2D3) dengan luas penampang *coupler* sesuai dengan luas tulangan longitudinal ditambah luas *coupler*. Elemen *coupler* didekati dengan elemen truss

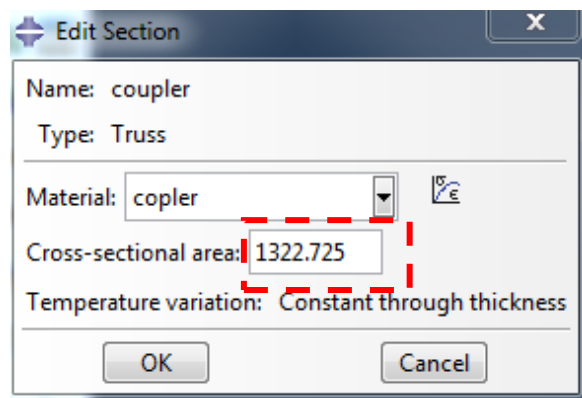
(T2D3) karena pada penelitian analisa dilakukan pada perilaku kolom pracetak dengan adanya sambungan *coupler*.



Gambar 3.10 Pemodelan *coupler* pada eksperimen



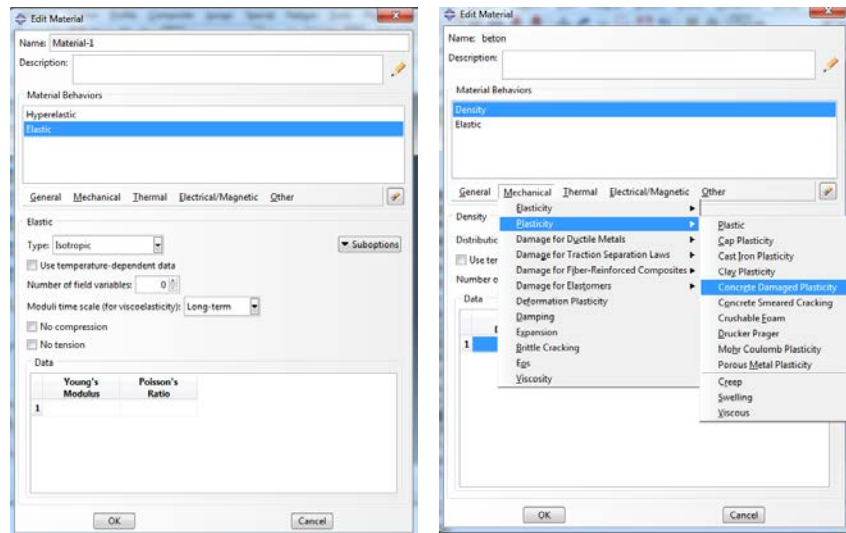
Gambar 3.11 Pemodelan *part coupler* pada ABAQUS



Gambar 3.12 Input luas elemen *coupler*

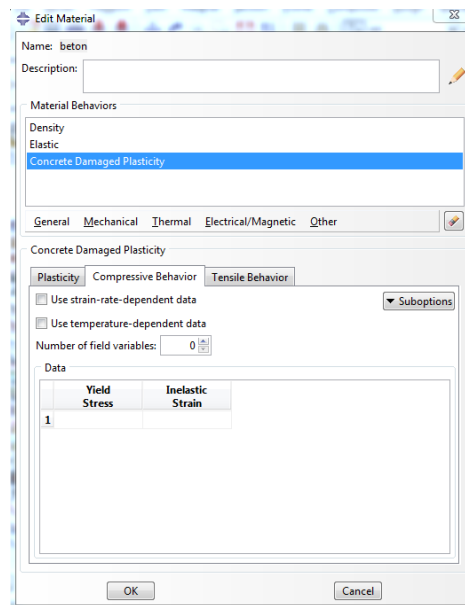
b. Penetapan properti material

Langkah selanjutnya adalah menetapkan properti material yang akan dimodelkan seperti jenis material, modulus elastisitas, dan *poisson ratio*. Pada ABAQUS jenis material yang di input dapat ditentukan sesuai perilaku material tersebut seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Input data material pada ABAQUS

Material baja dimodelkan berdasarkan perilaku material *density*, *elastic*, dan *plastic*. Modulus elastisitas dan *poisson ratio* diinput pada perilaku *elastic* baja. Data tegangan terhadap regangan hasil uji tarik baja diinput pada perilaku *plastic* baja. Material beton dimodelkan berdasarkan perilaku material *density*, *elastic*, dan *concrete damage plasticity* pada ABAQUS. Kriteria kegagalan beton pada ABAQUS 6.14 didefinisikan pada perilaku *concrete damage plasticity* yang disajikan pada Gambar 3.7. Data tegangan terhadap regangan hasil uji tekan beton diinput pada model *concrete damage plasticity* beton pada ABAQUS seperti yang disajikan pada Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Input data material beton pada ABAQUS

Data hasil dari persamaan 3.6 Saatcioglu dan Razvi (1992) dalam Razvi and Saatcioglu (1999) mengenai beton yang terkekang digunakan sebagai verifikasi empiris pada model *concrete damage plasticity* beton pada ABAQUS. Fungsi yang diusulkan oleh Lubliner et al. (1989) dan dimodifikasi oleh Lee dan Fenves (1998) diadopsi menjadi model plastisitas pada model *concrete damage plasticity* beton yang tersedia di ABAQUS. Penentuan perilaku material elastis (*elastic material behavior*) dan tidak elastis (*inelastic material behavior*) didefinisikan pada ABAQUS 6.14.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3.13)$$

Dimana:

E = Modulus Young

ν = *Poisson ratio*

G = Modulus geser

Pemodelan perilaku elastik material menggunakan tipe isotropik. Matriks persamaan 3.13 mendefinisikan *elastic material behavior* untuk kasus isotropik yang digunakan pada ABAQUS 6.14. Pemodelan perilaku inelastik besi menggunakan *isotropic hardening* karena besi yang *hardening* setelah leleh. Persamaan 3.14 mendefinisikan G (modulus geser) dan K (*Bulk modulus*) sebagai parameter perilaku yang dihitung dari input *poisson ratio* dan modulus Young yang diinputkan di perilaku *concrete damage plasticity* pada ABAQUS 6.14.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(3.14)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \dots\dots\dots(3.15)$$

Dimana:

K = *Bulk modulus*

Elastisitas perilaku inelastik besi menggunakan *isotropic hardening* di ABAQUS 6.14 ditulis dalam komponen volumetrik dan deviatorik sebagai berikut:

$$p = -K\varepsilon_{vol} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$p = \frac{1}{3}trace(\sigma) \dots\dots\dots(3.16)$$

Dimana:

ε_{vol} = Regangan volumetrik

σ = *equivalent pressure stress*

Perilaku inelastik besi *isotropic hardening* pada ABAQUS 6.14 dalam mendefinisikan perilaku material menggunakan integrasi metode *backward* Euler. Persamaan non linier untuk $\Delta\bar{e}^{pl}$ disajikan pada persamaan 3.20 yang kemudian diiterasi sampai mencapai konvergen.

$$S = 2Ge^{el} \dots\dots\dots(3.18)$$

$$c^{pl} = \frac{3G(\bar{\epsilon} - \Delta\bar{\epsilon}^{pl}) - \bar{\sigma}}{3G + H}, \text{ dimana } H = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}^{pl}} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$\Delta\bar{\epsilon}^{pl} = \Delta\bar{\epsilon}^{pl} + c^{pl} \dots\dots\dots (3.20)$$

Dimana:

S = Tegangan deviatorik

$\bar{\epsilon}^{pl}$ = Equivalent plastic strain

e^{el} = Regangan elastis

Pada pemodelan mekanisme kegagalan material beton digambarkan dengan model *Concrete damage plasticity* pada ABAQUS 6.14. Hubungan tegangan-regangan diatur oleh *scalar damaged elasticity* seperti pada persamaan 3.21.

$$\sigma = (1 - d)D_0^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl}) = D^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl}) \dots\dots\dots (3.21)$$

Dimana:

D_0^{el} = Initial (undamaged) elastic stiffness

D^{el} = Degraded elastic stiffness

d = Variabel degradasi kekuan skalar

Pada ABAQUS 6.14 variabel *hardening* pada kondisi kerusakan tarik dan tekan digambarkan oleh dua karakteristik regangan, yaitu regangan plastis pada tarik, $\bar{\epsilon}_t^{pl}$ dan tekan, $\bar{\epsilon}_c^{pl}$.

$$\bar{\epsilon}^{pl} = \begin{bmatrix} \bar{\epsilon}_t^{pl} \\ \bar{\epsilon}_c^{pl} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.22)$$

c. Membuat *Assembly*

Setelah geometri yang sudah dibuat pada langkah pertama selanjutnya beberapa geometri yang dibuat akan digabungkan (*Assembly*). *Assembly* adalah proses menggabungkan *part-part* yang sudah dibuat.



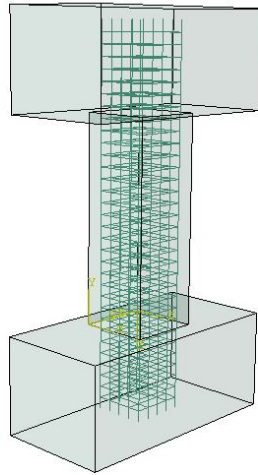
Gambar 3.15 Sambungan *grouted coupler* pada dasar kolom (Ou et al. 2015)



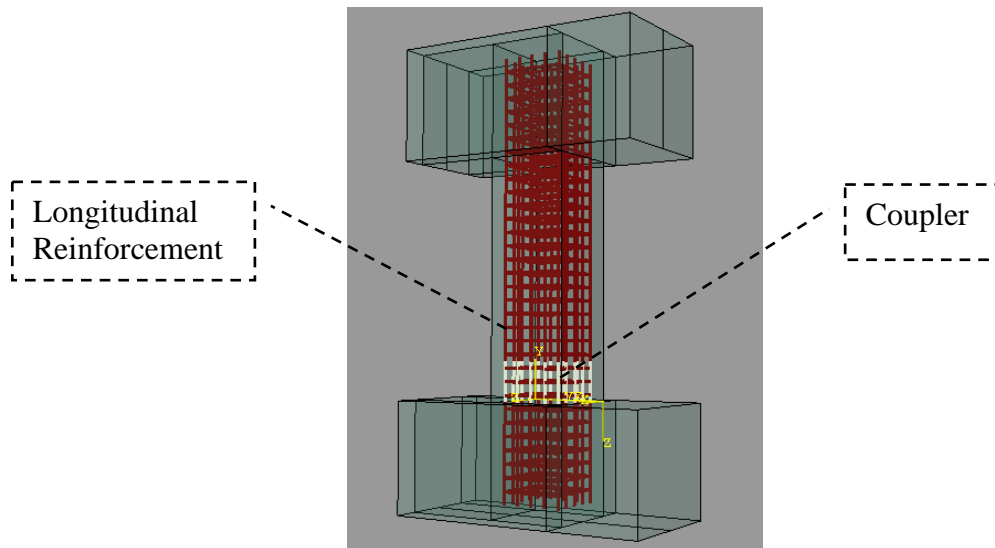
Gambar 3.16 Bagian atas dari potongan bawah kolom dengan batang tulangan longitudinal (Ou et al. 2015)



Gambar 3.17 Pelaksanaan *grouting*(Ou et al. 2015)



Gambar 3.18 Model numerik *assembly* kolom monolit pada ABAQUS



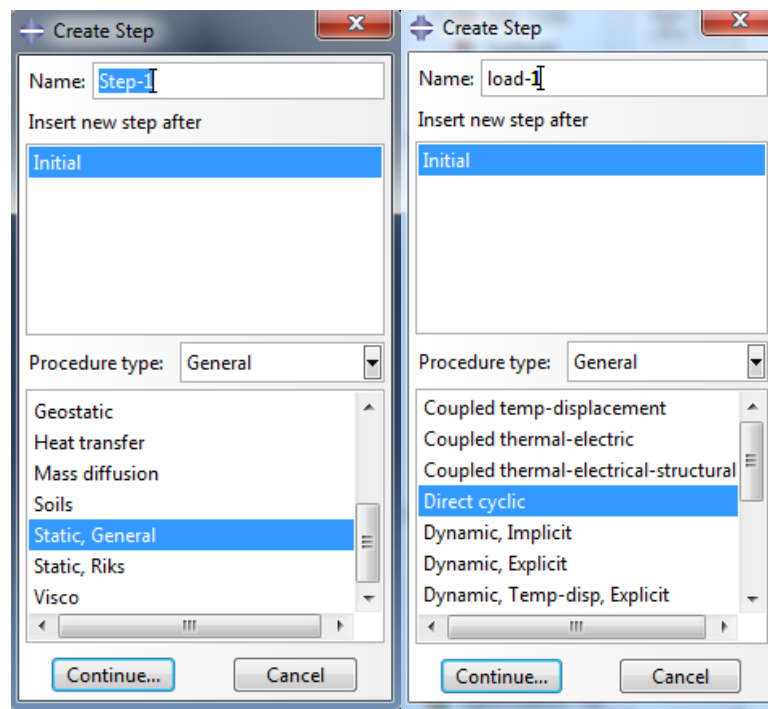
Gambar 3.19 Model numerik *assembly* sambungan *grouted coupler* dengan tulangan longitudinal pada ABAQUS

Proses *aseembly* juga mempertimbangkan berdasarkan proses pemasangan kolom pracetak yang dilakukan Ou dkk (2015). Gambar 3.15 menyajikan pemasangan sambungan *grouted coupler* terhadap tulangan longitudinal. Gambar 3.16 dan Gambar 3.17 menyajikan keadaan dasar kolom sebelum dipasang pracetak dan proses *grouting* setelah kolom pracetak dipasang berdasarkan pemasangan kolom beton pracetak yang dilakukan pada eksperimental Ou dkk (2015). Gambar 3.18 dan Gambar

3.19 menyajikan proses *assembly* dari tulangan longitudinal terhadap *grouted coupler* dan *assembly* keseluruhan model kolom beton pracetak.

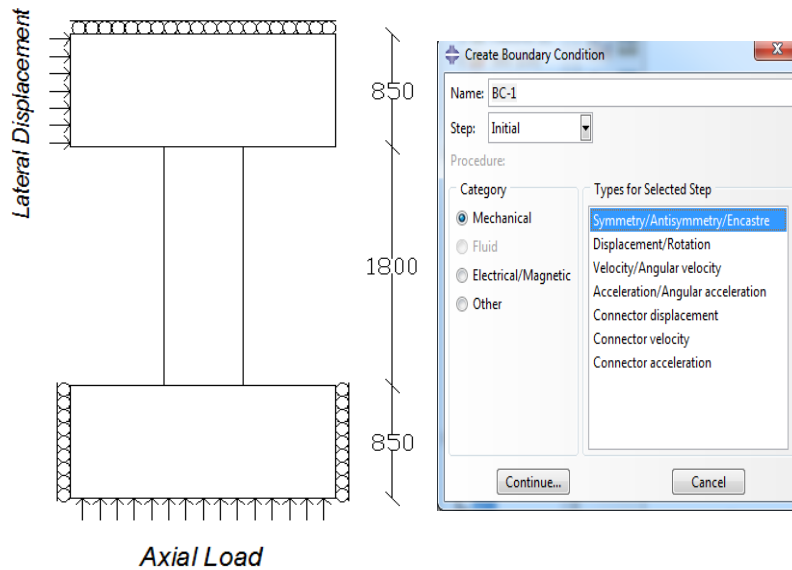
d. Menentukan *step* dan permintaan output

Pada langkah ini ditentukan *step-step* dan permintaan output untuk analisis yang akan dilakukan. *Step* harus ditentukan sebelum melakukan langkah selanjutnya.



Gambar 3.20 Input *step* pada ABAQUS

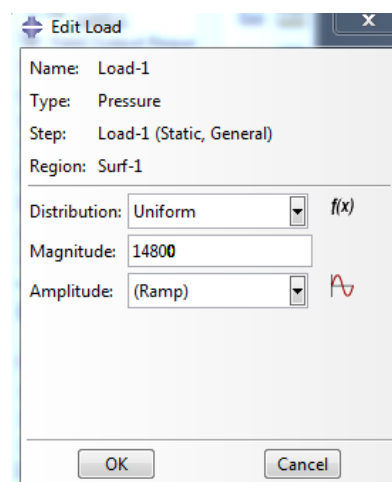
Gambar 3.17 menyajikan jenis input *step initial* untuk *restraint* dan *step load* pada ABAQUS.



Gambar 3.21 *Support restraint* kolom pracetak pada ABAQUS

e. Menetapkan tumpuan dan *apply load*

Pendenifisian jenis tumpuan dari model ditetapkan pada langkah ini. Selanjutnya menentukan jenis, arah, dan besar beban yang akan diterapkan pada model. Beban yang diberikan pada kolom pracetak mutu tinggi adalah *lateral displacement* dan beban aksial tekan. Besarnya beban aksial tekan adalah $0,1A_gf'_c$ dan $0,33A_gf'_c$. Rasio *drift* untuk beban *lateral displacement* adalah 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, dan 7%.



Gambar 3.22 *Axial load* kolom pracetak pada ABAQUS

Beban *pressure* diterapkan pada struktur yang berdeformasi pada analisis non linier. Ketergantungan nodal beban terhadap nodal perpindahan membuat kontribusi tambahan matriks Jacobian pada solusi ABAQUS 6.14. Pada pemodelan menggunakan kekakuan beban *pressure* pada permukaan dua dimensi dengan matriks kekakuan beban disajikan pada persamaan 3.23.

$$-d\delta W^E = - \int_g p \delta u \cdot k \times \frac{\partial u}{\partial g} t dg \dots\dots\dots (3.23)$$

Dimana:

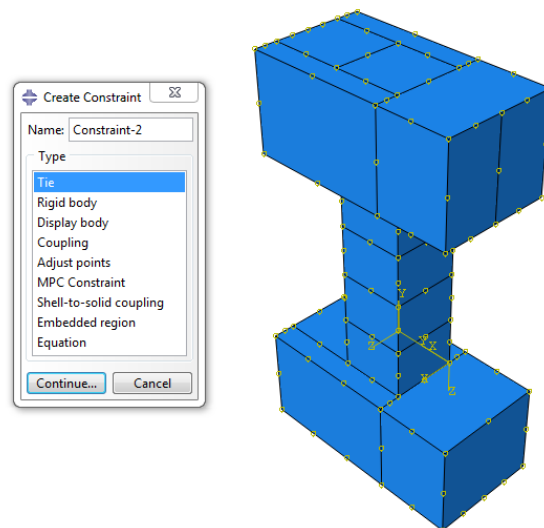
k = vektor satuan pada bidang model

t = tebal elemen solid dua dimensi

g = koordinat parameter permukaan

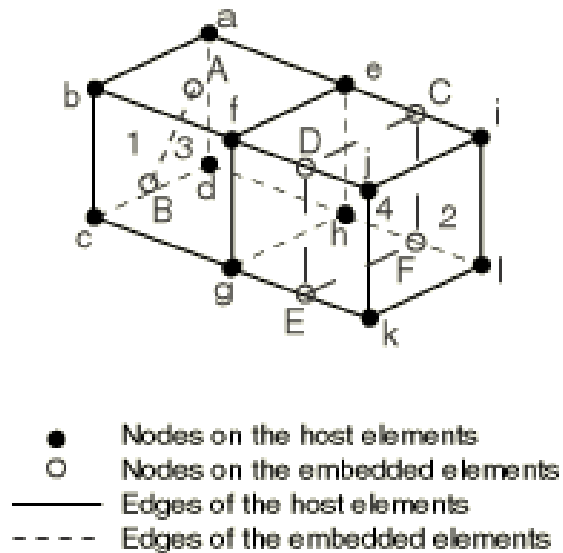
f. Constraints

Pendefinisian *bonding* antar permukaan elemen ditetapkan pada langkah ini pada ABAQUS. *Constraints* yang digunakan pada pemodelan kolom monolits dan pracetak mutu tinggi adalah *embedded constraints* dan *tie constraints*.



Gambar 3.23 Definisi *tie constraints* pada ABAQUS

Pertama menentukan *surface* yang akan diberi *bonding*. Kemudian menentukan *bonding* dengan definisi *constraints* pada ABAQUS. Gambar 3.23 menunjukkan definisi *constraints* yang digunakan untuk interaksi antara solid dengan solid pada ABAQUS.

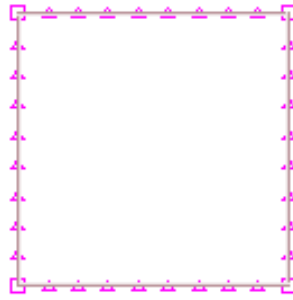


Gambar 3.24 Definisi *embedded* pada ABAQUS

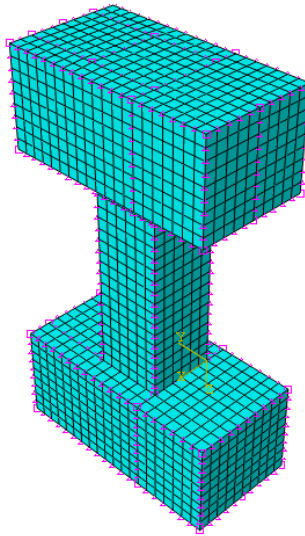
ABAQUS 6.14 menyediakan teknik elemen embedded sebagai teknik yang dapat digunakan pada elemen tulangan. ABAQUS mencari hubungan geometrik antara node dari elemen yang ditanamkan dan elemen host sehingga ketika node dari elemen embedded terletak didalam host maka derajat translasi pada node akan dihilangkan.

g. *Meshing* model

Meshing bertujuan untuk membagi setiap elemen menjadi potongan-potongan lebih kecil sehingga dapat dianalisis oleh ABAQUS dan didapatkan output dari nodal yang terbentuk.



Gambar 3.25 Model numerik *meshing* tulangan transversal pada ABAQUS



Gambar 3.26 Model numerik *meshing* model 100 mm pada ABAQUS

Gambar 3.25 dan Gambar 3.26 menyajikan hasil *meshing* pada tulangan transversal dan model spesimen kolom beton pracetak pada ABAQUS.

h. running model

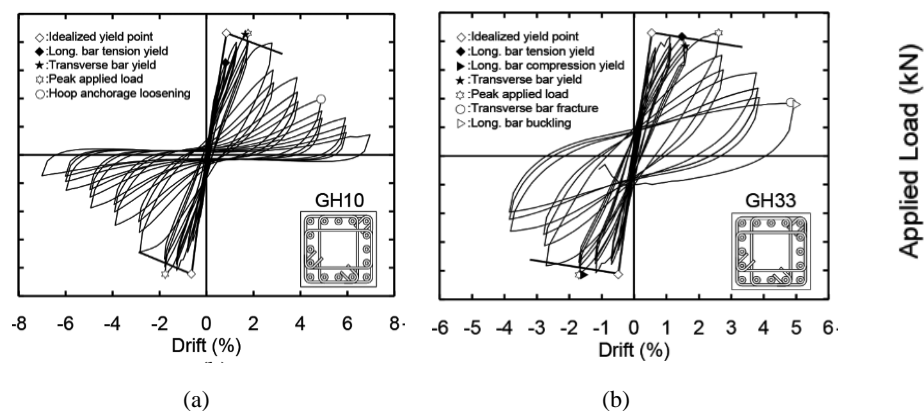
Setelah *meshing* dilakukan maka selanjutnya akan dilakukan pendefinisian *job* dan *running* dari model yang sudah dibuat.

2. *Postprocessing*

Setelah *running* model maka akan dihasilkan output dari ABAQUS seperti *deformed shape*, perpindahan yang terjadi, tegangan, regangan yang terjadi, dan output lainnya.

3.6. Analisa Hasil Pemodelan

Setelah pemodelan dengan input properti dan geometri pada software ABAQUS maka dilakukan running program. Dari hasil *running* model kolom pada software ABAQUS akan didapatkan hubungan beban terhadap perpindahan (*displacement*). Beban puncak (*peak load*) didapatkan respon dari *lateral displacement*. Output pemodelan adalah berupa kurva hubungan beban terhadap perpindahan (*displacement*), gaya maksimum yang didapatkan dari kurva *force-displacement*, *displacement* saat 75% *post peak*, data regangan tulangan longitudinal, data regangan *sleeve*, data rotasi di daerah blok beton, data rotasi di daerah kolom yang terpasang *sleeve*, dan data rotasi di daerah kolom yang tidak terpasang *sleeve* akibat beban aksial dan lateral *displacement*.



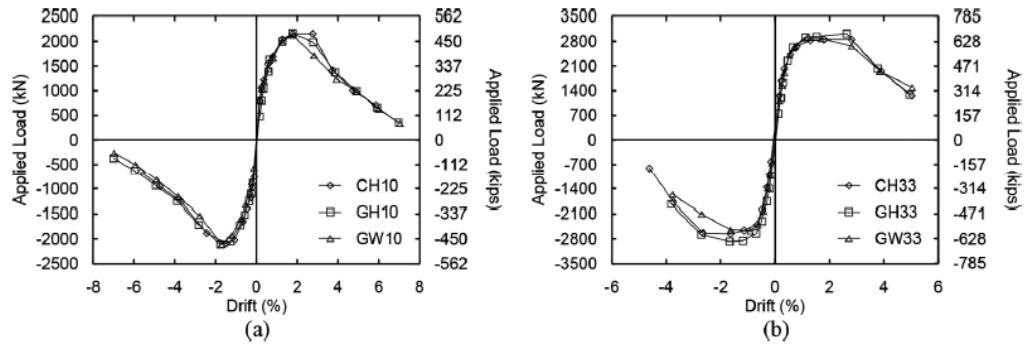
Gambar 3.27 Perilaku historis : (a) G10 ; (b) G33 (Ou et al. 2015)

Hasil output tersebut akan divalidasikan dengan hasil eksperimental Ou et al. (2015). Gambar 3.27 menyajikan perilaku historis kolom beton pracetak dengan sambungan besi *grouted coupler* hasil dari eksperimental yang dilakukan Ou, Alrasyid et al. (2015).

3.7. Validasi Hasil

Setelah dilakukan analisa dari hasil output software ABAQUS, selanjutnya hasil output dari pemodelan dengan ABAQUS akan divalidasi dengan hasil eksperimental yang telah dilakukan oleh Ou dkk pada tahun 2015 dengan judul " *Cyclic Behavior of Precast High-Strength Reinforced Concrete Columns* " yang

berupa hubungan beban terhadap perbandingan perpindahan (*displacement*) terhadap tinggi kolom (*drift*) akibat beban aksial dan lateral *displacement*.



Gambar 3.28 Respon *envelop* : (a) G10 ; (b) G33 (Ou et al. 2015)

Gambar 3.28 menyajikan respon envelop kolom beton pracetak dengan sambungan besi *grouted coupler* hasil dari eksperimental yang dilakukan Ou, Alrasyid et al. (2015).

3.8. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa dan validasi pemodelan kolom beton pracetak dengan sambungan besi *grouted sleeve coupler* menggunakan program ABAQUS terhadap hasil eksperimental yang dilakukan Ou, Alrasyid et al. (2015), maka dapat ditarik kesimpulan dari hasil tersebut.

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

BAB 4

HASIL DAN ANALISA

4.1. Umum

Pada bab ini akan disajikan hasil pemodelan kolom monolit beton mutu tinggi dan kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan grouted sleeve coupler berupa kurva *reaction force* terhadap *displacement* dan bentuk perubahan kolom (*deformed shape*) takibat beban aksial dan beban lateral *displacement* monotonik dengan menggunakan program bantu ABAQUS. Hasil analisis ABAQUS dari 2 model kolom monolit dan 2 model kolom pracetak mutu tinggi diverifikasi dengan hasil eksperimental yang dilakukan oleh Ou et al. (2015).

4.2. Material

Input properti material pada ABAQUS didekati dengan persamaan empiris. Persamaan empiris digunakan untuk menentukan hubungan tegangan leleh terhadap regangan plastis pada tekan beton, tarik beton, dan tarik baja tulangan. Perilaku plastis beton ditentukan dengan Concrete Damaged Plasticity(CDP) pada ABAQUS. Input material beton pada ABAQUS terdiri dari *elastic behavior* dan CDP. *Elastic behavior* berisi input modulus elastisitas dan poisson ratio. Hasil model konstutif tekan beton menggunakan kuat tekan 74 MPa ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hasil model konstutif tarik beton menggunakan kuat tarik 5,1 MPa ditunjukkan pada Gambar 4.2. Hasil model konstutif tarik tulangan menggunakan kuat leleh tarik 713 MPa ditunjukkan pada Gambar 4.3. Kurva tegangan-regangan beton tekan didekati dengan persamaan Razvi and Saatcioglu (1999). Kurva tegangan-regangan beton tarik didekati dengan persamaan Hsu and Zhang (1996). Kurva tegangan-regangan tulangan didekati dengan persamaan Mander (1983).

Tabel 4.1 Properti beton pada kolom

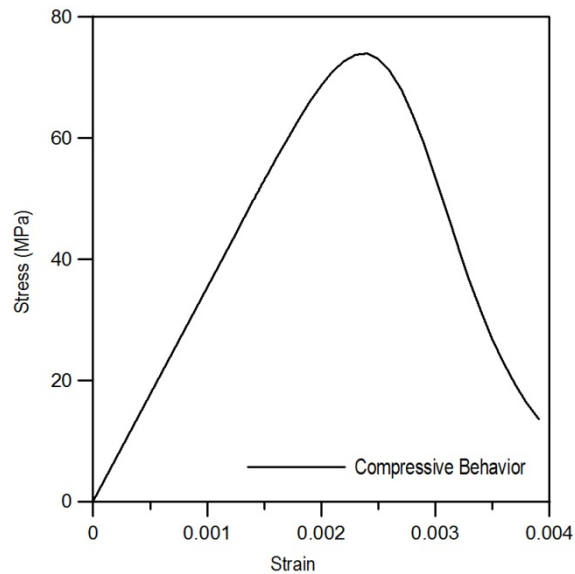
Property	Value
Density (ton/mm ³)	0.0000000024
Modulus Young (MPa)	35459.71989
Poison's Ratio	0.2
Dilation Angle	40
Eccentricity	0.1
FB ₀ /FC ₀	1.16
K	0.667
Viscosity Parameter	0,001
Yield Strength (Compressive)	74
Yield Strength (Tensile)	5.15

Tabel 4.2 Properti tulangan pada kolom

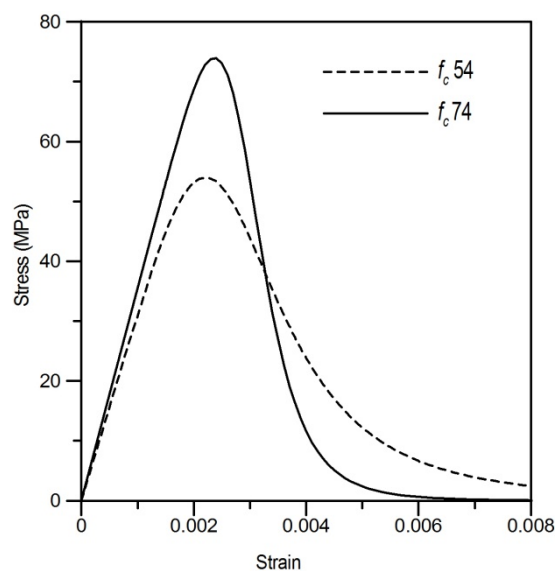
Property	Value
Density (ton/mm ³)	0.0000000078
Modulus Young (MPa)	200000
Poison's Ratio	0.3
Yield Strength (MPa)	713
Ultimate Strength (MPa)	932

Parameter-parameter yang diinput ke definisi perilaku material khususnya material beton pada ABAQUS dapat disajikan pada Tabel 4.1. Parameter-parameter tersebut diinputkan ke dalam perilaku CDP pada beton. Parameter eksetrisitas, FB₀/FC₀, dan K sesuai yang direkomendasikan oleh ABAQUS. Parameter sudut dilatasi dan viskositas diasumsikan agar prediksi sesuai dengan hasil eksperimental. Parameter viskositas 0,001 diasumsikan tidak berbeda jauh terhadap hasil jika viskositas nol. Parameter yang mendefinisikan perilaku tarik tulangan disajikan pada Gambar 4.2. Perilaku tarik tulangan antara lain *density*,

elastic, dan *plastic* yang diinputkan pada ABAQUS. Perilaku elastis pada tulangan didefinisikan oleh nilai Modulus Young dan poisson ratio.



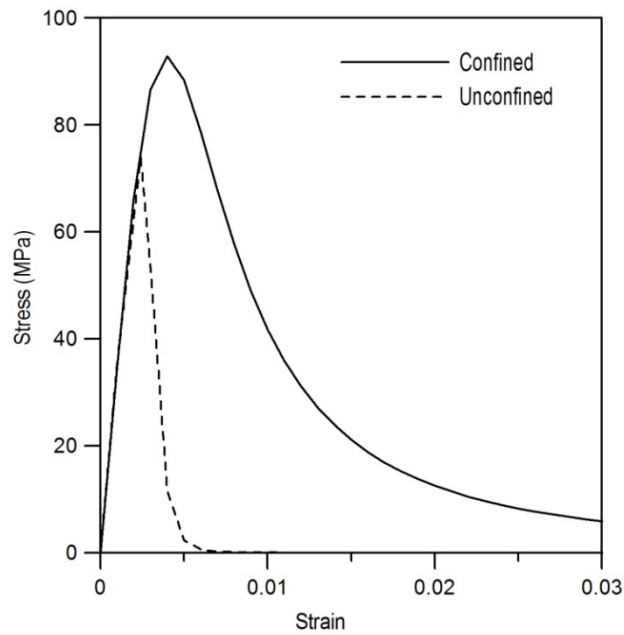
Gambar 4.1 Kurva tegangan-regangan model konstitutif tekan beton f_{c74} menggunakan persamaan Razvi and Saatcioglu (1999)



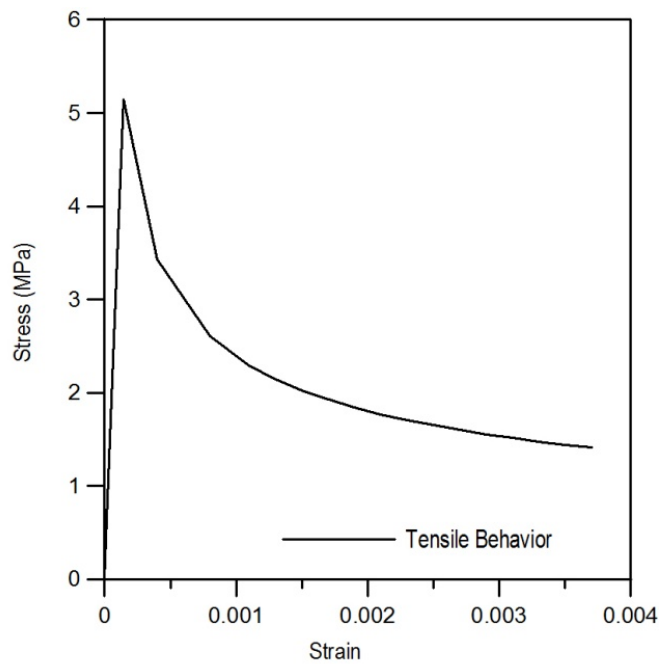
Gambar 4.2 Kurva tegangan regangan beton mutu normal vs beton mutu tinggi menggunakan persamaan Attard and Setunge (1996)

Mutu beton mempengaruhi hasil kurva tegangan regangan. Mutu beton yang lebih tinggi menyebabkan kurva softening lebih tajam. Hal ini menyebabkan input

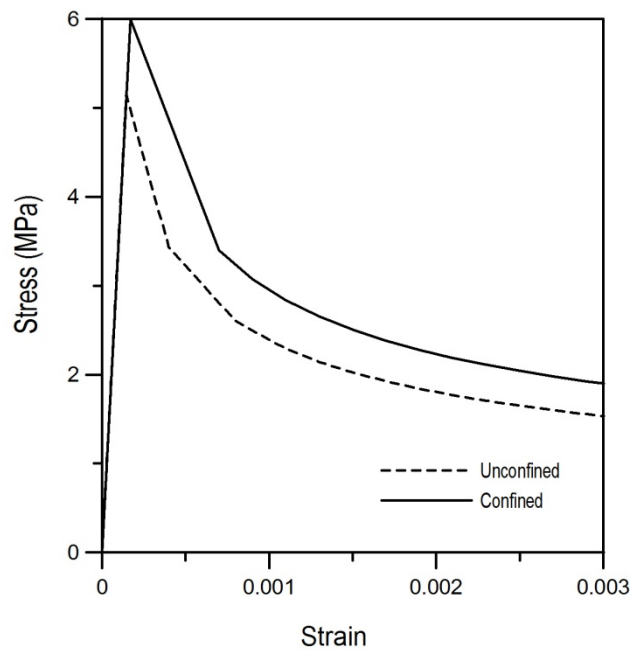
damage parameter beton mutu tinggi pada ABAQUS menjadi lebih kecil karena menyesuaikan regangan plastis. Pada pemodelan struktur dengan menggunakan beton mutu normal pendenifisian damage parameter yang lebih besar dibandingkan beton mutu tinggi menyebabkan perilaku softening yang lebih baik.



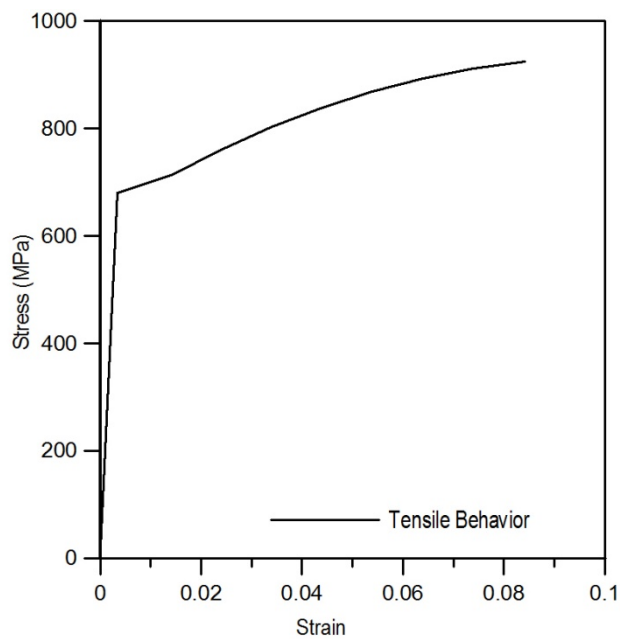
Gambar 4.3 Kurva stress-strain Confined Unconfined pada tekan beton f_c 74



Gambar 4.4 Kurva tegangan-regangan model konstitutif tarik beton



Gambar 4.5 Kurva stress-strain Confined Unconfined pada tarik beton f_c 74



Gambar 4.6 Kurva tegangan-regangan model konstitutif tarik tulangan

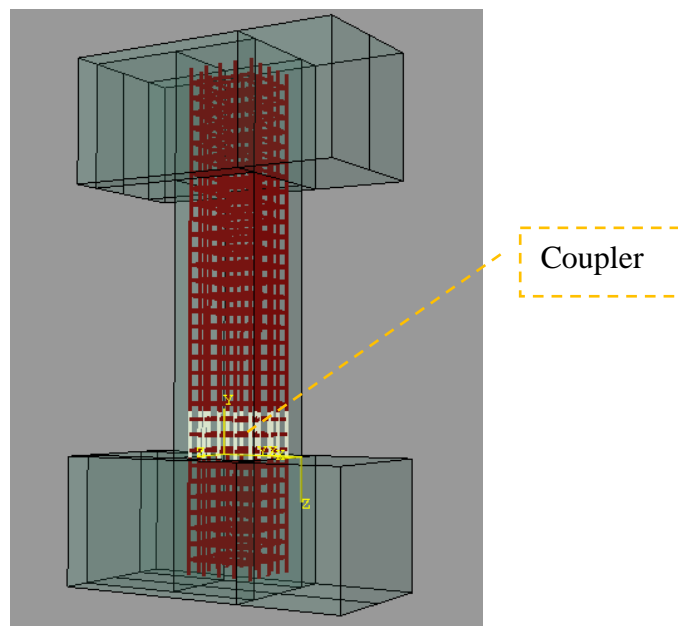
4.3. Pemodelan Kolom

Pemodelan part terdiri dari 3 part untuk kolom monolit dan 4 part untuk kolom pracetak. Part kolom beton monolit terdiri dari part beton profil I, part

tulangan lomgitudinal, dan part tulangan transversal. Part kolom beton pracetak terdiri dari part beton profil I, part tulangan longitudinal, part coupler, dan part tulangan transversal. Pemodelan part beton menggunakan solid CD38R sedangkan part tulangan dan coupler menggunakan T3D2. Pada elemen T3D2 input yang diberikan pada ABAQUS adalah luas penampang elemen.

Tabel 4.3 Luas elemen tulangan dan coupler

Element	Value (mm ²)
D25	490.625
D13	132.665
D16	200.96
<i>Coupler</i>	1322.725



Gambar 4.7 Pemodelan coupler pada kolom pracetak

4.4. Pembebanan dan Perletakan

Step pada pemodelan ada 3 step yaitu step initial untuk perletakan , step axial load untuk pembebanan aksial konstan, dan step lateral load untuk pembebanan lateral displacement. Pembebanan pada model semua spesimen kolom terdiri dari dua beban yaitu beban aksial dan beban lateral *displacement*. Beban aksial diterapkan pada permukaan blok beton atas. Beban tersebut didefinisikan pada ABAQUS sebagai beban *pressure* sebagai *uniform load*. Beban

aksial diterapkan secara konstan. Sementara lateral displacement adalah beban yang berupa dorongan sampai jarak tertentu yang diterapkan bersama beban aksial yang bekerja secara konstan. Beban lateral displacement yang diterapkan pada ABAQUS ditentukan berdasarkan *drift* puncak pada hasil eksperimen. Perletakan yang digunakan pada pemodelan kolom semua spesimen adalah perletakan roll yang memungkinkan untuk bertranslasi satu arah.

Tabel 4.4 Beban aksial pada model kolom

Axial load	Length mm	Wide mm	f_c MPa	Total force KN	Uniform Load MPa
$0.1A_g f_c$	600	600	74	2664	1.332
$0.33A_g f_c$	600	600	77	9147.6	4.5738

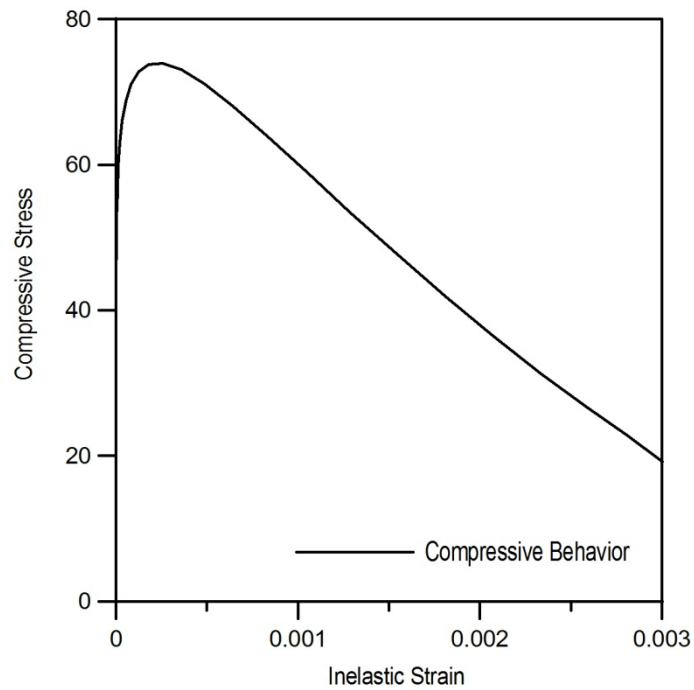
Tabel 4.5 Beban lateral displacement pada model kolom

Name	Ultimate Drift %	Ultimate Displacement
CH10	3.1	55.8
GH10	3.06	55.08
CH33	3.4	61.2
GH33	3.27	58.86

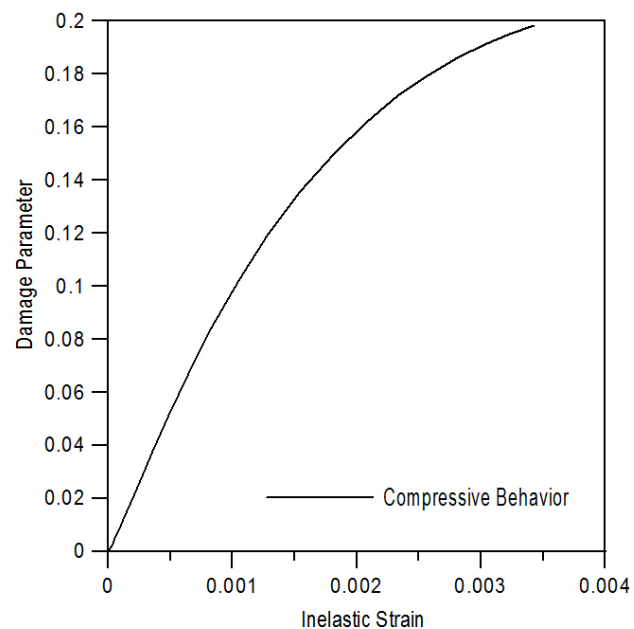
4.5. Studi Input Parameter Tekan Beton

Studi input parameter tekan beton dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan beton akibat tekan. Hubungan tegangan dan regangan beton hasil metode elemen hingga (ABAQUS) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan Razvi and Saatcioglu (1999). Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada ABAQUS sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan beton yang diharapkan. Beton dimodelkan sebagai kubus dengan ukuran $100 \times 100 \text{ mm}^2$ kemudian dibebani titik pada sudut elemen kubus dengan *displacement* sebesar 5,1 mm pada *boundary condition* berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan beton. Pemodelan elemen kubus beton ditunjukkan pada Gambar 4.11. Input material yang diberikan

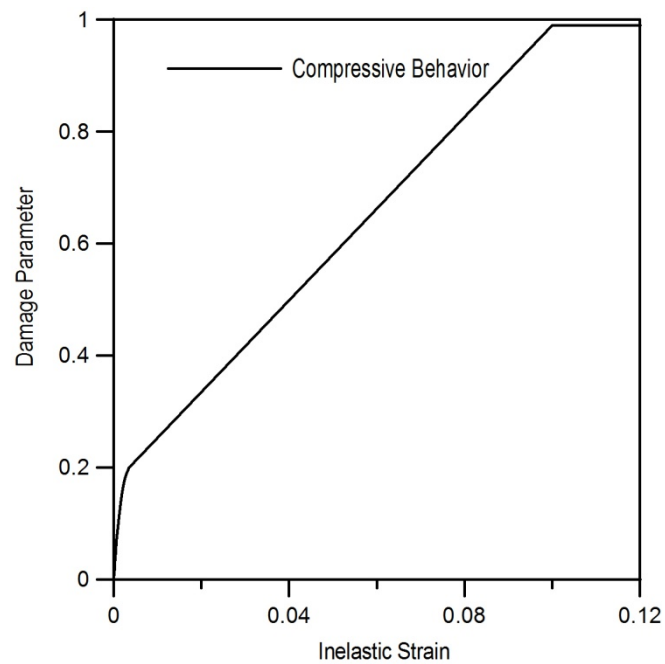
pada ABAQUS adalah berupa hubungan *yield stress-inelastic strain* dan *damage parameter-inelastic strain* yang didapatkan dari kurva *stress-strain* beton.



Gambar 4.8 Kurva inelastic strain-*yield compressive stress* f_c 74

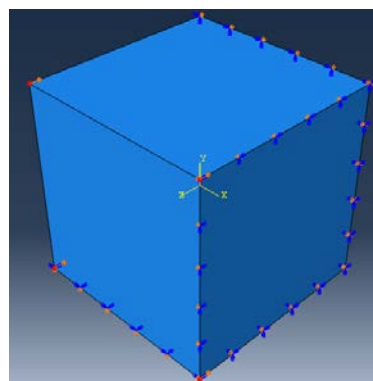


Gambar 4.9 Kurva inelastic strain-damage parameter *compressive stress* f_c 74

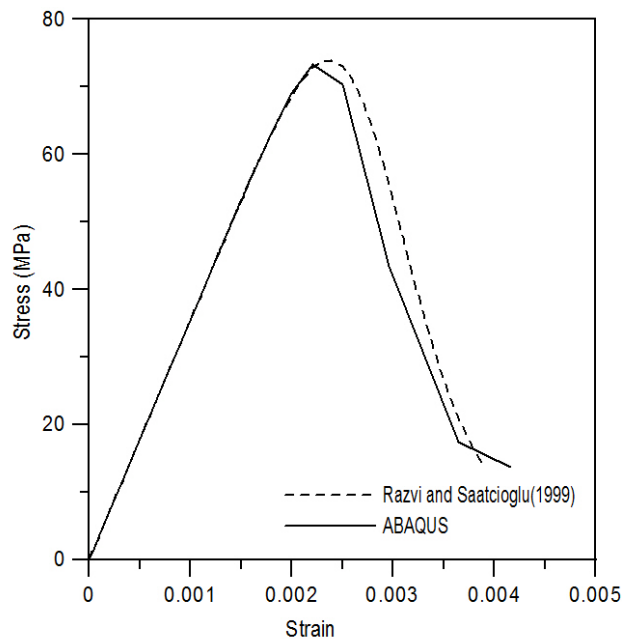


Gambar 4.10 Kurva inelastic strain-damage parameter *compressive stress* f_c 74 sampai strain 0.12

Data yang diinput pada *compressive behavior* ABAQUS didapatkan dari persamaan *fracture energy*. Data yang diinput tersebut ditunjukkan dalam bentuk kurva pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Hasil damage parameter untuk beton mutu tinggi pada saat puncak bernilai kecil supaya regangan plastis pada kurva tegangan regangan beton tidak bernilai negatif. Hasil output stress ultimit pada uji axial kubus tekan untuk spesimen C10 pada pemodelan *finite element* (ABAQUS) didapatkan sebesar 73,362 MPa yang mempunyai silisih 0,78% dari stress ultimit manual yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.

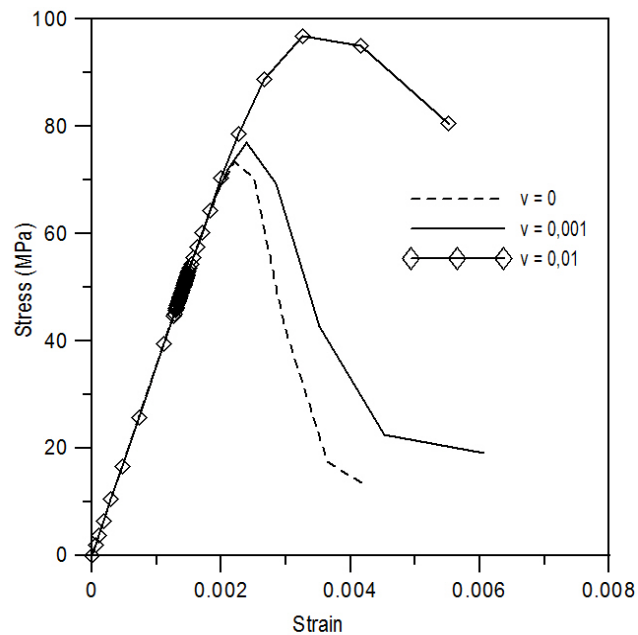


Gambar 4.11 Boundary conditions model beton tekan



Gambar 4.12 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan persamaan Razvi and Saatcioglu (1999)

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa pemodelan beton tekan menggunakan elemen C3D8R dengan *viscosity parameter* 0 pada ABAQUS memperlihatkan kemiripan dengan hasil manual pendekatan Razvi and Saatcioglu (1999) berdasarkan mutu aktual hasil ekperimental Ou et al. (2015). Gambar 4.13 menunjukkan pengaruh parameter viskositas terhadap hasil perilaku CDP pada beton. Dari kurva tersebut dapat disimpulkan bahwa viskositas 0,001 cukup mendekati hasil dari pemodelan dengan parameter viskositas 0. Pada pemodelan spesimen kolom pada ABAQUS dikarenakan model yang lebih kompleks viskositas tidak dapat diinput sebesar 0 namun harus mendekati 0. Oleh karena itu dalam pemodelan kolom monolit maupun kolom pracetak mutu tinggi menggunakan viskositas 0,001 pada CDP beton ABAQUS.



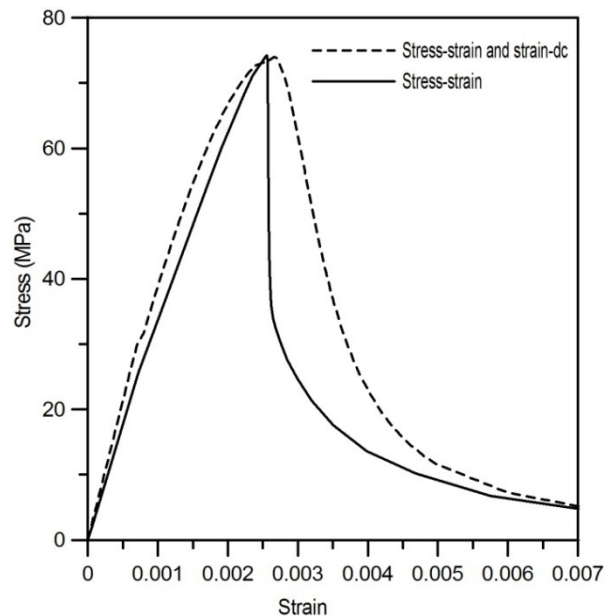
Gambar 4.13 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan persamaan Razvi and Saatcioglu (1999) dengan variasi parameter viskositas pada ABAQUS

Tabel 4.6 Akurasi tegangan ultimit pada studi parameter beton tekan dengan perbedaaan parameter viskositas

Razvi and Saatcioglu (1999)		ABAQUS			Stess Ratio
Ultimate Strain	Ultimate Stress	Viscosity	Ultimate Strain	Ultimate Stress	
0.0024	74	0	0.002205	73.362	0.9914
		0.001	0.002393	76.9947	1.0405
		0.01	0.003263	96.8097	1.3082

Parameter viskositas ditentukan pada perilaku CDP beton. Pada perilaku tekan beton dilakukan studi mengenai pengaruh parameter viskositas menggunakan program ABAQUS. Hasil output menunjukkan viskositas 0,001 menghasilkan rasio tegangan ultimit sebesar 1,04 dibandingkan dengan hasil manual sedangkan viskositas 0,01 menghasilkan rasio tegangan ultimit sebesar 1,3 dibandingkan dengan hasil manual. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan viskositas 0,001 dan 0,01 mempunyai prediksi yang cukup mendekati hasil

manual sehingga dapat digunakan untuk pemodelan kolom beton monolit dan pracetak mutu tinggi



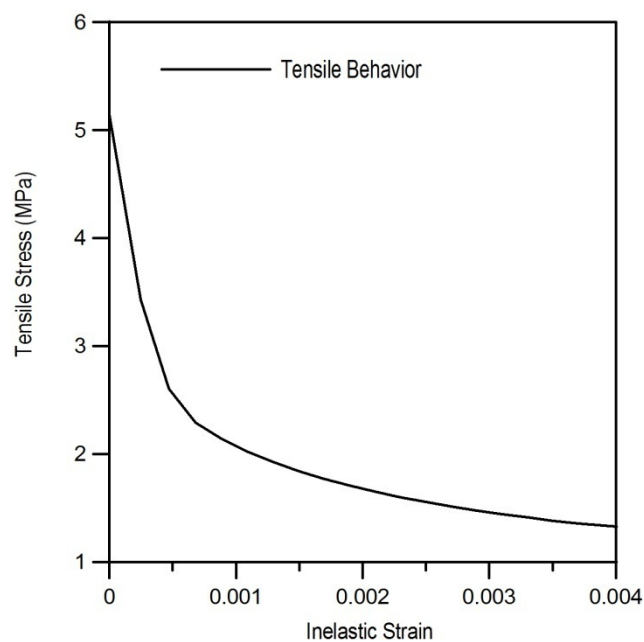
Gambar 4.14 Kurva tegangan regangan beton tekan f_{c74} dengan input damage parameter vs tanpa damage parameter

Damage parameter pada input material beton tekan pada ABAQUS menentukan hasil output kurva tegangan regangan yang didapatkan. Hal ini terlihat dari perilaku softening yang lebih baik ditunjukkan dengan adanya input damage parameter. Hasil output kurva tegangan regangan tanpa menggunakan damage parameter menghasilkan kurva yang lebih tajam pada bagian softening. Namun demikian damage parameter masih dapat ditiadakan dalam pemodelan beton mutu tinggi. Dengan tidak adanya damage parameter pesan pada ABAQUS yang terjadi akibat damage parameter dapat dihindari. Dengan tidak adanya damage parameter pada input material beton kurva softening akan lebih tajam.

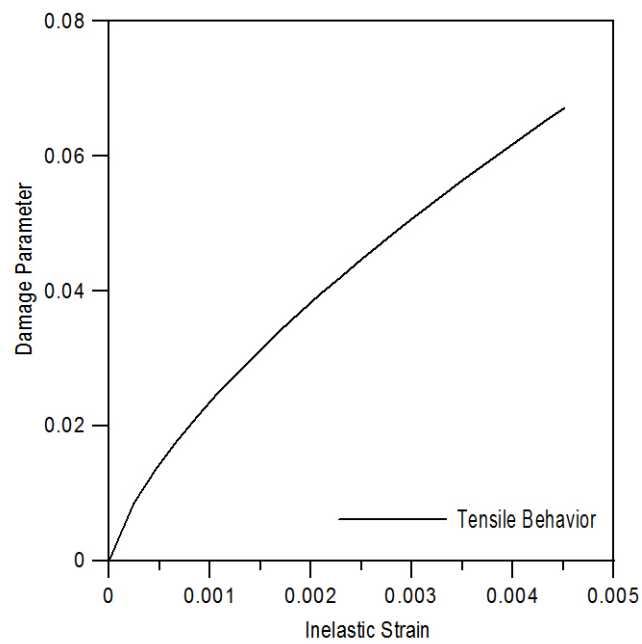
4.6. Studi Input Parameter Tarik Beton

Studi input parameter tarik beton dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan beton akibat tarik. Hubungan tegangan dan regangan beton hasil metode elemen hingga (ABAQUS) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris berdasarkan kuat tarik aktual beton pada eksperimental

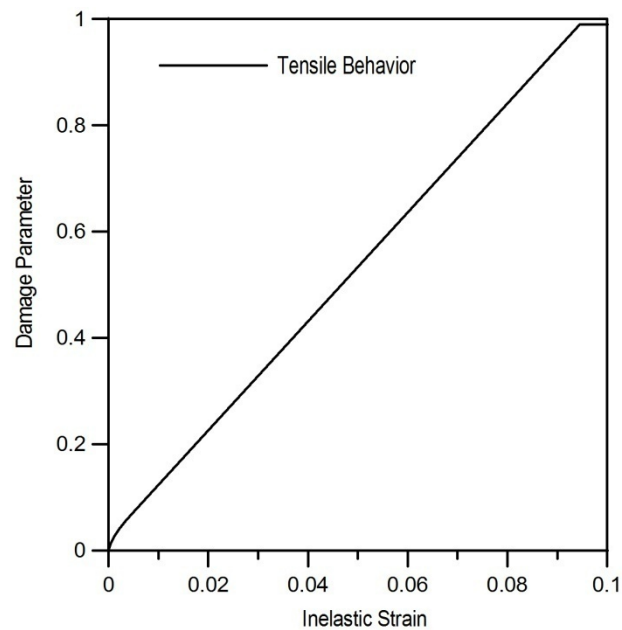
Ou et al. (2015). Hubungan tegangan dan regangan tarik beton hasil metode elemen hingga (ABAQUS) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada ABAQUS sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan tarik beton yang diharapkan. Beton dimodelkan sebagai kubus dengan ukuran $100 \times 100 \text{ mm}^2$ kemudian dibebani tarik titik pada sudut elemen kubus dengan *displacement* sebesar 1 mm pada *boundary condition* berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan beton yang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.15 Kurva inelastic strain-yield *tensile stress* f_c 74



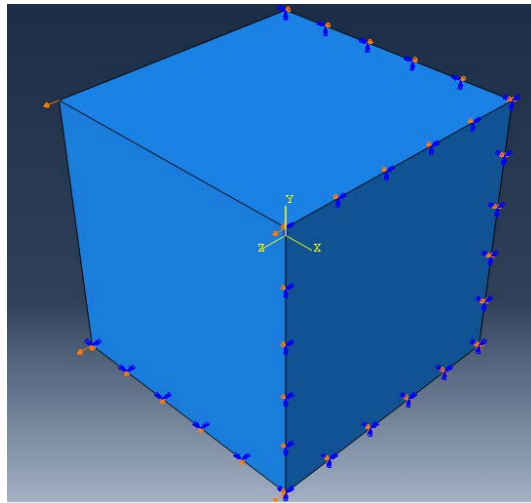
Gambar 4.16 Kurva inelastic strain-damage parameter beton tarik f_c 74



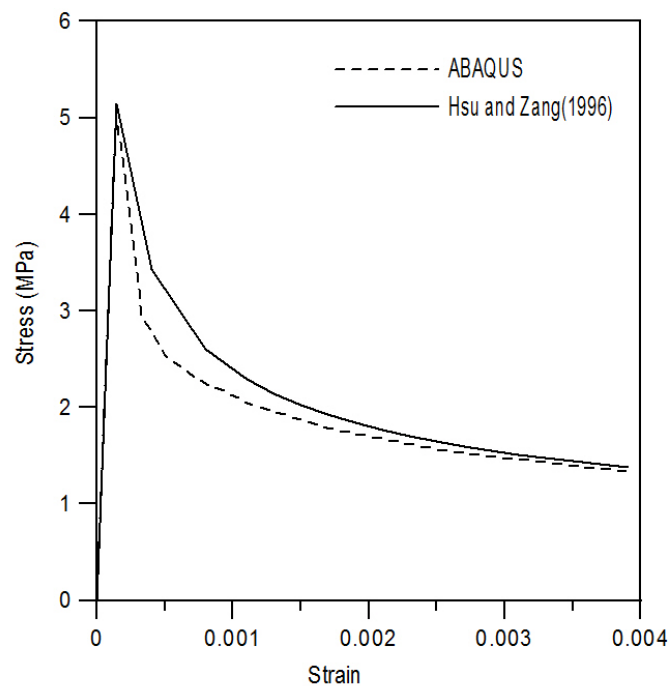
Gambar 4.17 Kurva inelastic strain-damage parameter beton tarik f_c 74 sampai strain 0.1

Hasil damage parameter untuk beton mutu tinggi pada saat puncak bernilai kecil supaya regangan plastis pada kurva tegangan regangan beton tidak bernilai negatif. Pada pemodelan spesimen kolom pada ABAQUS dikarenakan model

yang lebih kompleks viskositas tidak dapat diinput sebesar 0 namun harus mendekati 0. Oleh karena itu dalam pemodelan kolom monolit maupun kolom pracetak mutu tinggi menggunakan viskositas 0,001 pada CDP beton ABAQUS. Hasil output stress ultimit pada uji axial tarik kubus untuk spesimen C10 pada pemodelan *finite element* (ABAQUS) didapatkan sebesar 5,0349 MPa yang mempunyai silisih 2,31 % dari stress ultimit eksperimental yang ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.18 Boundary condition model beton tarik

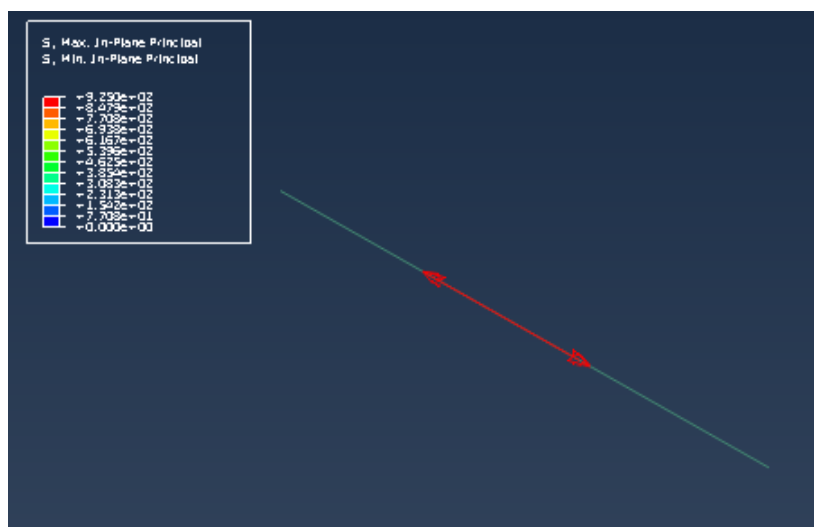


Gambar 4.19 Kurva tegangan-regangan beton akibat tarik menggunakan persamaan Hsu and Zhang (1996)

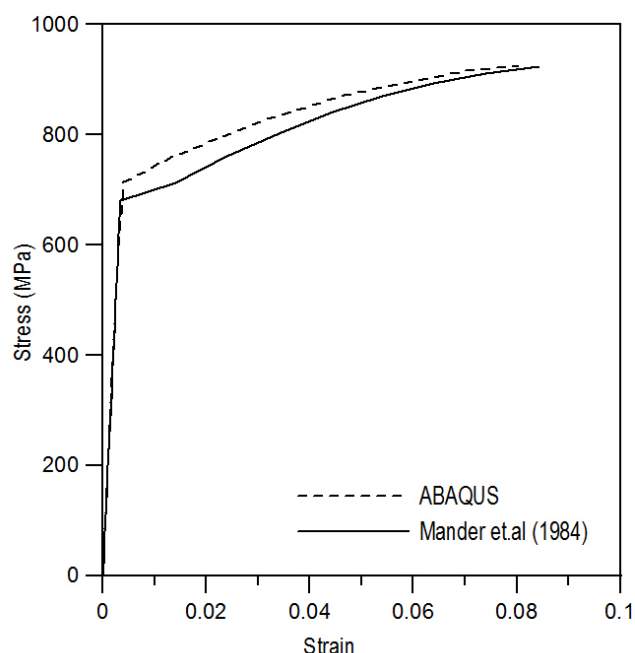
Gambar 4.12 menunjukkan bahwa pemodelan beton tarik menggunakan elemen C3D8R pada ABAQUS memperlihatkan kemiripan dengan hasil pendekatan empiris berdasarkan mutu aktual hasil ekperimental Ou et al. (2015).

4.7. Studi Input Parameter Tarik Tulangan

Studi input tarik tulangan dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan tulangan akibat tarik. Hubungan tegangan dan regangan tulangan hasil metode elemen hingga (ABAQUS) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter tulangan pada ABAQUS sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan tulangan yang diharapkan. Tulangan D25 dimodelkan wire tipe truss (TD32) dengan ukuran 100 mm kemudian dibebani tarik titik pada ujung dengan *displacement* sebesar 1 mm pada *boundary condition* berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan tulangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Hasil output stress ultimit pada uji axial tarik tulangan untuk spesimen C10 pada pemodelan *finite element* (ABAQUS) didapatkan sebesar 925 MPa pada strain 0,8 yang mempunyai silisih 0,064 % dari stress ultimit manual yang ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.20 Plot simbol *deformed shape*(ABAQUS) tulangan longitudinal kuat leleh 713 MPa



Gambar 4.21 Kurva tegangan-regangan tulangan longitudinal kuat leleh 713 MPa akibat tarik menggunakan persamaan Mander (1983)

Ini berarti pemodelan tulangan menggunakan elemen T3D2 pada ABAQUS memperlihatkan kemiripan dengan hasil perhitungan manual berdasarkan mutu aktual hasil ekperimental Ou et al. (2015) menggunakan persamaan Mander (1983) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.21.

Tabel 4.7 Akurasi studi parameter material beton dan tulangan

Material	Persamaan Empiris		ABAQUS		Ratio
	Ultimate Strain	Ultimate Stress	Ultimate Strain	Ultimate Stress	
Tensile Con.	0.00015	5.14965	0.000142	5.03049	0.9768
Compressive Con.	0.0024	74	0.002205	73.362	0.9913
Tensile Steel	0.084	924.42	0.08	925.01	1.0006

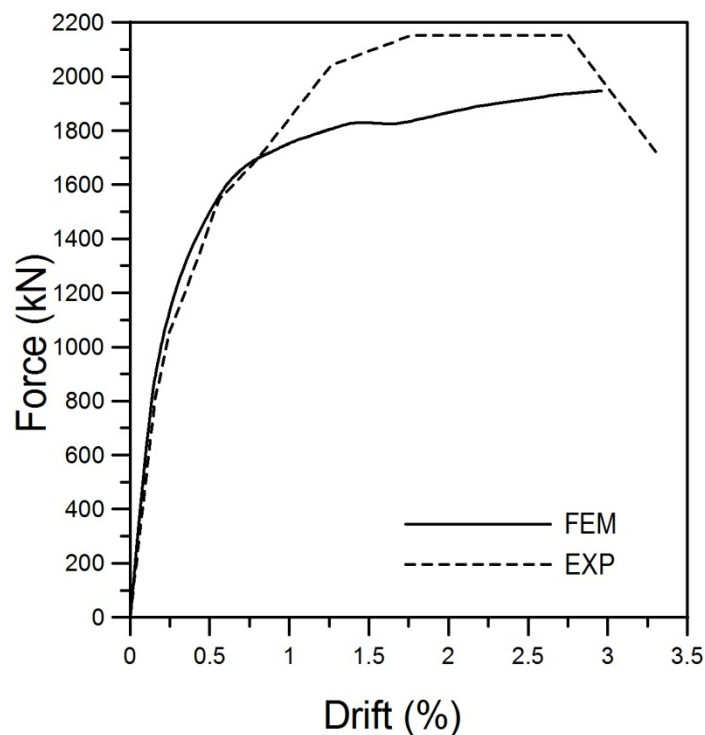
Akurasi pemodelan material diukur dari hasil studi input parameter. Akurasi yang baik ditunjukkan dari hasil ouput ABAQUS seperti yang disajikan pada Tabel 4.7. Rasio hasil tegangan ultimit manual dan ABAQUS pada beton tarik,

beton tekan, dan tarik tulangan antara lain 0.97, 0.99, dan 1. Hal ini menunjukkan bahwa FEA dengan program ABAQUS mempunyai prediksi yang baik pada studi input parameter beton dan baja mutu tinggi.

4.8. Hubungan Force-Displacement

4.8.1. Hasil Spesimen C10

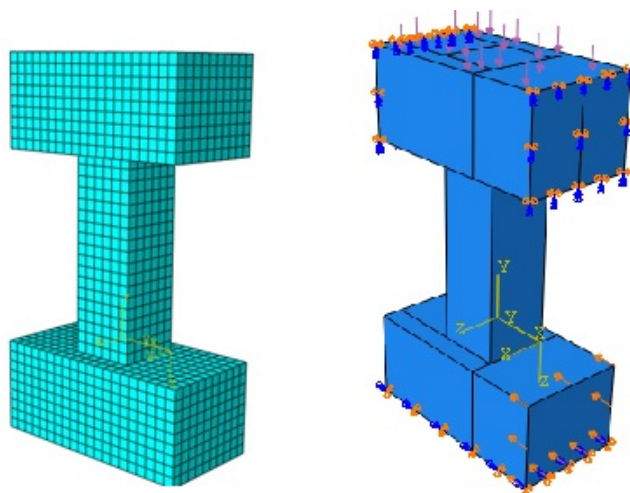
Berdasarkan studi input material beton tekan, tarik, dan tulangan tarik hubungan inelastic strain - yield stress dan hubungan inelastic strain - damage parameter diinputkan sebagai material pada pemodelan kolom monolit. Kolom monolit dimodelkan seperti apesimen pada saat eksperimen dengan blok beton atas, blok beton bawah dan kolom ukuran 600 mm x 600 mm.



Gambar 4.22 Kurva force-displacement kolom beton monolit C10 hasil ABAQUS vs eksperimen spesimen CH10 oleh Ou et al. (2015)

Kurva pada kondisi inelastic yang berbeda cukup jauh dengan eksperimen diengaruhi oleh parameter viskositas dan efek kekangan pada ABAQUS. Spesimen C10 menggunakan beban aksial 2664 kN (0,1Agfc) dengan beban displacement berdasarkan displacement maksimal hasil eksperimental 55,8 mm.

Material yang digunakan adalah beton dengan kuat tekan 74 MPa, tulangan longitudinal dengan kuat leleh 713 MPa, dan tulangan transversal dengan kuat leleh 886 MPa. Pada pemodelan spesimen C10 step yang digunakan terdiri dari 3 step yaitu *initial*, *axial load* dan *lateral load*. Step *axial load* dan *lateral load* menggunakan *maximum number of increments* 10000 dengan ukuran *increment* initial 0,001, minimum 10^{-9} , dan maksimum 1. Opsi *nlggeom* yang mendefinisikan non-linearitas geometrik diaktifkan pada proses simulasi model. Spesimen kolom C10 menggunakan tulangan longitudinal D25 dan tulangan transversal D13 yang didekati dengan elemen TD32 pada ABAQUS. Hasil pemodelan yang ditunjukkan kurva pada Gambar 4.22 didapatkan dengan *viscosity* parameter 0,001 dan ukuran *mesh* 100 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16. Elemen solid beton pada model kolom dibagi menjadi beberapa *cell* sebelum dilakukan *meshing* pada model. Analisis model kolom menggunakan Hourglass control pada elemen yang dapat meningkatkan akurasi pada model numerik. Perletakan yang digunakan pada pemodelan adalah roll pada tiga sisi seperti pada Gambar 4.23. Pada saat proses running model kolom monolit proses running berhenti pada displacement 53,3 mm atau drift 2,96 % dengan pesan " *Time increment required is less than the minimum specified*" pada ABAQUS. Ini berarti algoritma friksi plastisitas pada model ini kesulitan mencapai konvergen pada increment ke 3345 dari total increment 10000. Hasil output *force* didapatkan dari jumlah *force* pada setiap node permukaan yang diberikan beban *displacement*.

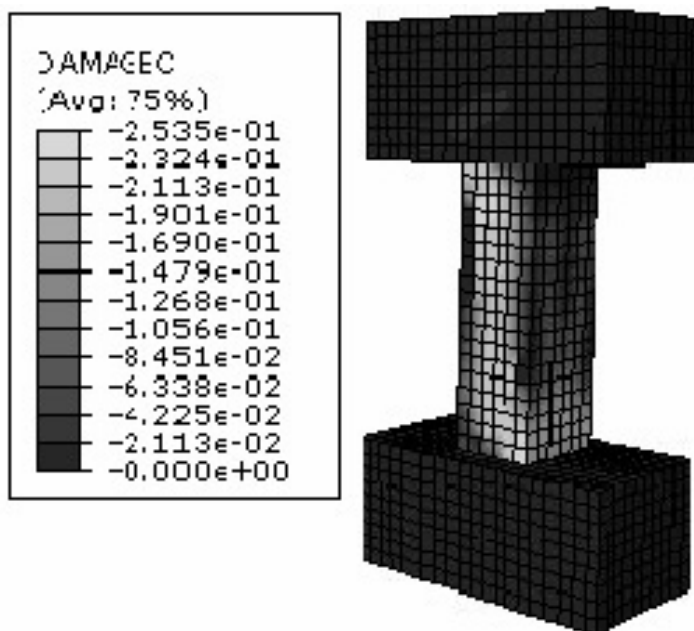


Gambar 4.23 *Mesh dan boundary conditions* yang digunakan pada model kolom beton

Tabel 4.8 Korelasi hasil kurva *force - displacement* spesimen C10

Experiment		FEA		Ratio
Drift Ratio	Applied Load	Drift Ratio	Applied Load	
0.248	1058.925	0.249	1133.77	1.07068026
0.557	1543.921	0.557	1556.55	1.00818006
0.800	1694.444	0.801	1697.73	1.00193917

Hasil output pemodelan kolom beton monolit untuk spesimen C10 menunjukkan kolom tersebut mencapai puncak penerapan beban sebesar 1946,65 kN pada displacement 53,3 mm (drift of 2,96%). Gambar 4.15 menunjukkan adanya perbedaan hasil antara hasil output ABAQUS dengan hasil eksperimental pada beban puncak. Beban puncak pada eksperimental terjadi pada drift 1,77 % dengan penerapan beban 2152 kN. Sementara hasil output pemodelan kolom pada saat displacement 31,6 (drift of 1,76 %) adalah 1834 kN.



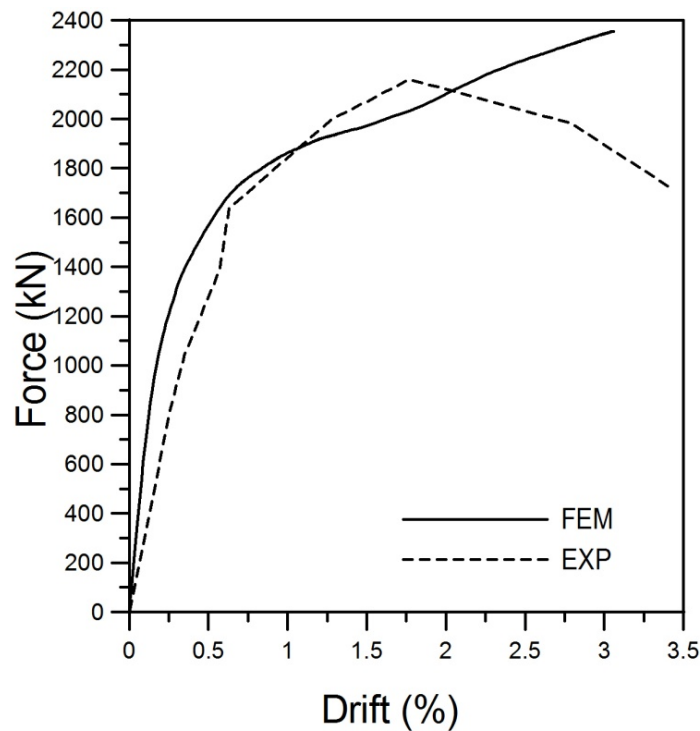
Gambar 4.24 *Damage Compressive* kolom beton monolit C10 hasil ABAQUS

Gambar 4.22 menunjukkan hasil finite element (ABAQUS) tidak mengalami softening seperti yang terjadi pada elemen eksperimental. Prediksi model kolom monolit menghasilkan respon perilaku softening yang lebih kaku. Perilaku softening pada CDPM ABAQUS juga dibahas dalam investigasi numerik pada kolom *concrete-filled-steel-tube* (CFST) dibawah beban eksentris yang dilakukan Piscesa et al. (2017) menunjukkan bahwa prediksi menggunakan CDPM pada ABAQUS mengalami perilaku softening yang lebih kaku dibandingkan dengan hasil eksperimental.

4.8.2. Hasil Spesimen G10

4.8.2.1. Tidak Terkekang (*Unconfined*)

Pada pemodelan spesimen G10 parameter yang digunakan pada perilaku CDP dengan viscosity parameter 0,001 dan *dilatation angle* 40 Spesimen kolom G10 menggunakan tulangan longitudinal D25 dan tulangan transversal D13 yang didekati dengan elemen TD32 pada ABAQUS. Elemen *copler* dimodelkan TD32 dengan material kuat leleh tarik 713 MPa. Spesimen G10 menggunakan beban aksial $0,1A_gf_c$ dengan beban displacement berdasarkan displacement maksimal hasil eksperimental 55,8 mm. Pada pemodelan spesimen G10 step yang digunakan terdiri dari 3 step yaitu initial, *axial load* dan *lateral load*. Step *axial load* dan *lateral load* menggunakan *maximum number of increments* 10000 dengan ukuran *increment* initial 0,001, minimum 10^{-9} , dan maksimum 1. Hasil pemodelan yang ditunjukkan kurva pada Gambar 4.17 didapatkan dengan ukuran *mesh* 100 mm. Pada proses running model kolom pracetak G10 muncul pesan *job completed* pada *displacement* 55 mm pada ABAQUS. Hal ini menunjukkan bahwa pada pemodean tersebut iterasi dapat mencapai konvergen pada increment 10000.

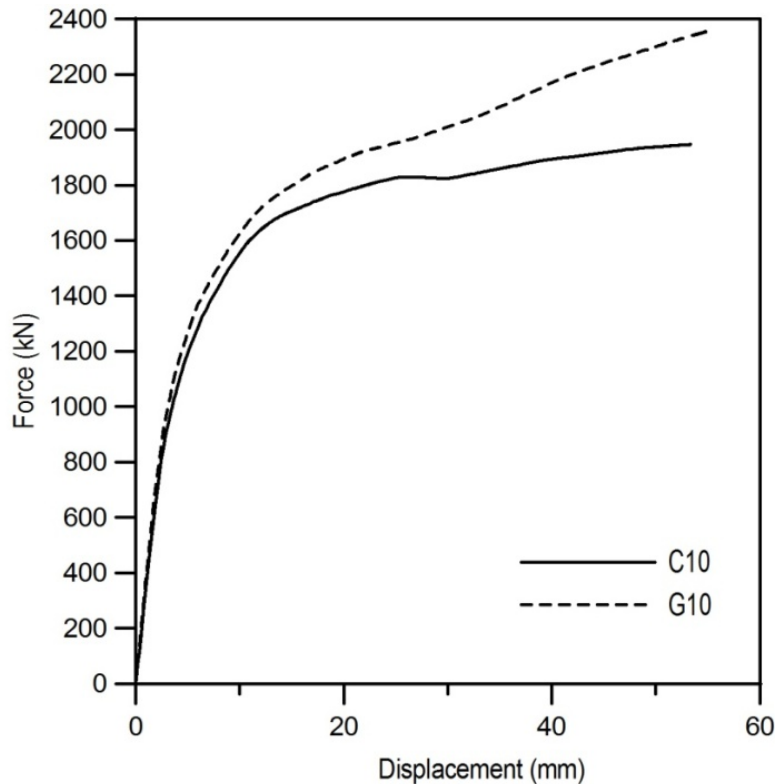


Gambar 4.25 Kurva force-displacement kolom beton pracetak G10 vs eksperimen spesimen GH10 oleh Ou et al. (2015)

Hasil output pemodelan kolom beton monolit untuk spesimen G10 menunjukkan kolom tersebut mencapai puncak penerapan beban pada displacement 55 mm (drift 3,055%) dengan beban 2355 kN. Beban puncak pada eksperimetral terjadi pada drift 1,77% dengan penerapan beban 2160 kN. Gambar 4.25 menunjukkan adanya perbedaan hasil antara hasil output spesimen G10 dengan hasil eksperimen pada beban puncak. Gambar 4.25 menunjukkan hasil finite element (ABAQUS) tidak mengalami softening seperti yang terjadi pada elemen eksperimental. Prediksi model kolom pracetak menghasilkan respon perilaku softening yang lebih kaku.

Tabel 4.9 Korelasi hasil kurva *force - displacement* spesimen G10

Experiment		FEA		Ratio
Drift Ratio	Applied Load	Drift Ratio	Applied Load	
0.628	1636.193	0.61886667	1681.67	0.97295717
1.273	1995.743	1.27267778	1931.69	1.0331592
1.770	2160.984	1.75731667	2030.61	1.06420455



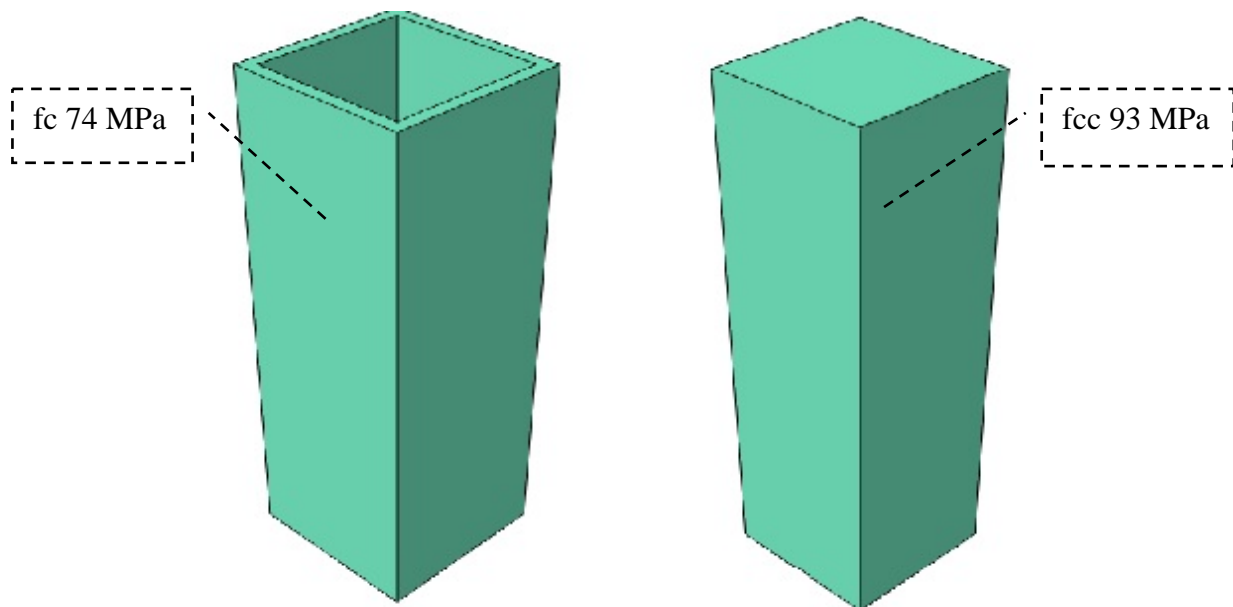
Gambar 4.26 Kurva force-displacement kolom beton pracetak C10 vs G10

Perbedaan hasil pada kurva C10 dan G10 dikarenakan perbedaan input parameter viskositas pada perilaku CDP beton. Perilaku softening pada CDPM ABAQUS juga dibahas dalam investigasi numerik pada kolom *concrete-filled-steel-tube* (CFST) dibawah beban eksentris yang dilakukan Piscesa et al. (2017) menunjukkan bahwa prediksi menggunakan CDPM pada ABAQUS mengalami perilaku softening yang lebih kaku dibandingkan dengan hasil eksperimental. Perilaku softening pada prediksi FEA juga dapat dipengaruhi oleh perbedaan boundary conditions FEA dengan kenyataan pada saat eksperimental. Hal ini juga dapat terjadi karena damage parameter beton yang kecil pada beban puncak.

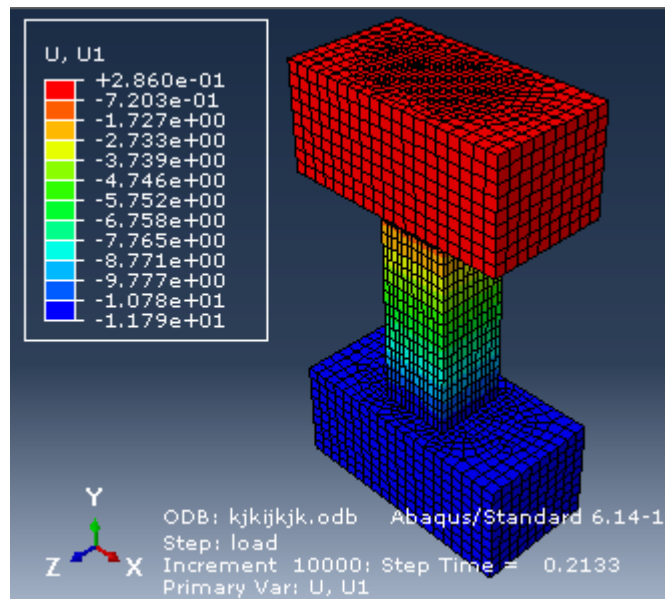
4.8.2.2. Terkekang (*Confined*)

Pada pemodelan spesimen G10 *Confined* parameter yang digunakan pada perilaku CDP dengan viscosity parameter 0,001 dan *dilatation angle* 40 Spesimen

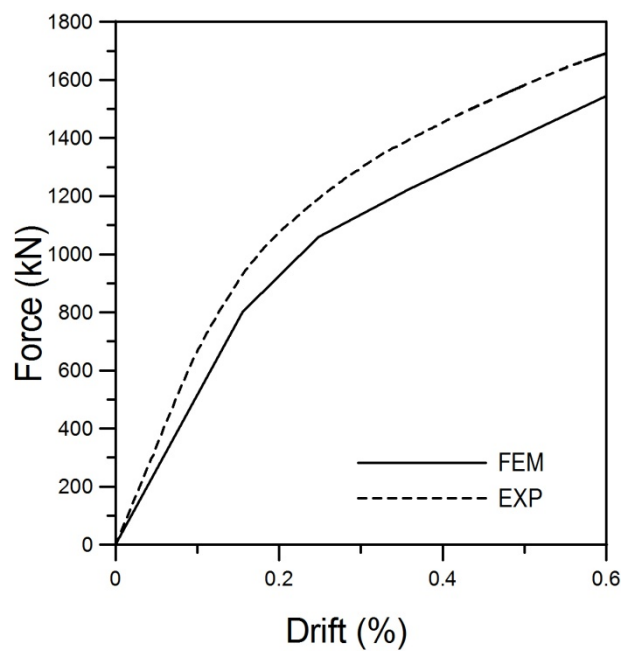
kolom G10 *Confined* menggunakan tulangan longitudinal D25 dan tulangan transversal D13 yang didekati dengan elemen TD32 pada ABAQUS. Elemen *copler* dimodelkan TD32 dengan material kuat leleh tarik 713 MPa. Spesimen G10 *Confined* menggunakan beban aksial $0,1A_g f_c$ dengan beban displacement berdasarkan displacement maksimal hasil eksperimental 55,8 mm. Pada pemodelan spesimen G10 *Confined* step yang digunakan terdiri dari 3 step yaitu initial, *axial load* dan *lateral load*. Step *axial load* dan *lateral load* menggunakan *maximum number of increments* 10000 dengan ukuran *increment* initial 0,001, minimum 10^{-9} , dan maksimum 1. Hasil pemodelan yang ditunjukkan pada Gambar 4.29 didapatkan dengan ukuran *mesh* 100 mm. Pada proses running model kolom pracetak G10 *Confined* muncul pesan *too many increments needed to complete the step* pada displacement 10.7 mm pada ABAQUS. Hal ini menunjukkan bahwa pada pemodelan tersebut iterasi dapat mencapai konvergen dan berhenti pada displacement 10.7 mm. Hasil output pemodelan kolom beton monolit untuk spesimen G10 *Confined* menunjukkan kolom tersebut mencapai puncak penerapan beban pada displacement 10.7 mm (drift 0.65%).



Gambar 4.27 Pemodelan Kolom Terkekang



Gambar 4.28 Hasil output *displacement* spesimen G10 confined

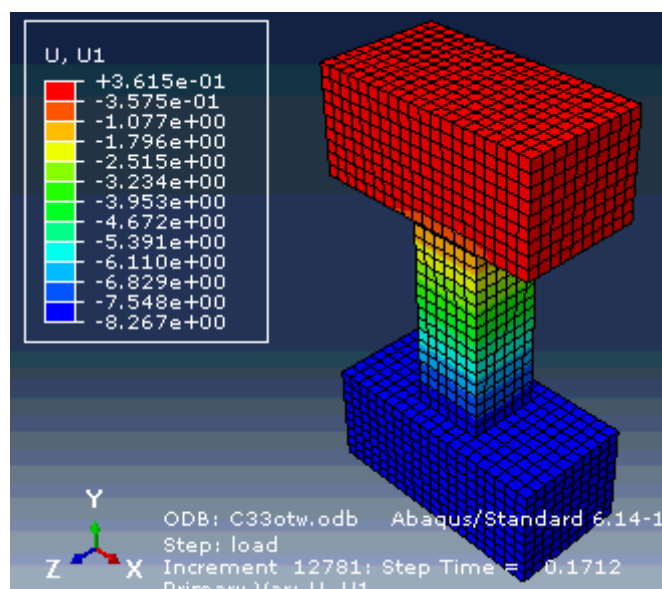


Gambar 4.29 Kurva force displacement spesimen C10 confined vs eksperimen CH10

4.8.3. Hasil Spesimen C33

Pada pemodelan spesimen C33 parameter yang digunakan pada perilaku CDP dengan viscosity parameter 0,001 dan *dilatation angle* 40 Spesimen kolom C33 menggunakan tulangan longitudinal D25 dan tulangan transversal D16 yang didekati dengan elemen TD32 pada ABAQUS. Spesimen C33 menggunakan

beban aksial $0,33A_g f_c$ dengan beban displacement berdasarkan displacement maksimal hasil eksperimental 55,8 mm. Pada pemodelan spesimen C33 step yang digunakan terdiri dari 3 step yaitu *initial*, *axial load* dan *lateral load*. Step *axial load* dan *lateral load* menggunakan *maximum number of increments* 10000 dengan ukuran *increment* initial 0,001, minimum 10^{-9} , dan maksimum 1. Hasil pemodelan yang ditunjukkan Gambar 4.30 didapatkan dengan ukuran *mesh* 100 mm. Pada proses running model kolom pracetak C33 muncul pesan *too many increments needed to complete the step* pada displacement 8 mm pada ABAQUS. Hal ini menunjukkan bahwa pada pemodelan tersebut iterasi dapat mencapai konvergen dan berhenti pada displacement 8 mm. Hasil output pemodelan kolom beton pracetak untuk spesimen C33 menunjukkan kolom tersebut mencapai puncak penerapan beban pada displacement 8 mm (drift 0,4 %).

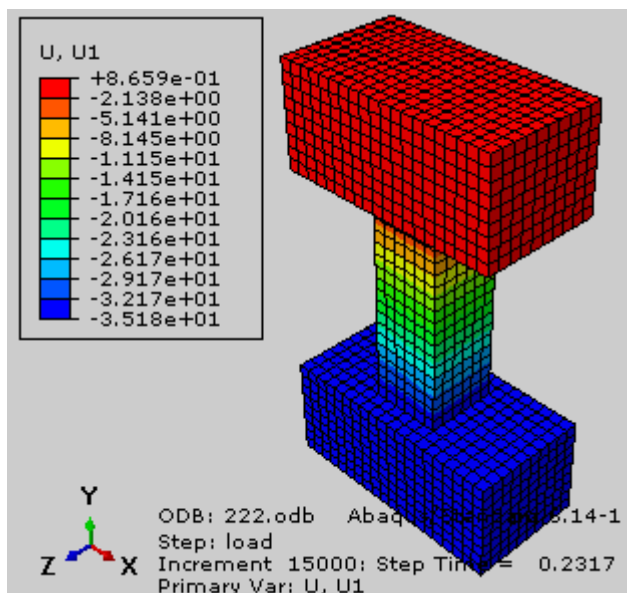


Gambar 4.30 Hasil output displacement yang terjadi pada spesimen C33

4.8.4. Hasil Spesimen G33

Pada pemodelan spesimen G33 parameter yang digunakan pada perilaku CDP dengan viscosity parameter 0,01 dan *dilatation angle* 40. Spesimen kolom G33 menggunakan tulangan longitudinal D25 dan tulangan transversal D16 yang didekati dengan elemen TD32 pada ABAQUS. Elemen *copler* dimodelkan TD32 dengan material kuat leleh tarik 713 MPa. Spesimen G33 menggunakan beban aksial $0,33A_g f_c$ dengan beban displacement berdasarkan displacement maksimal

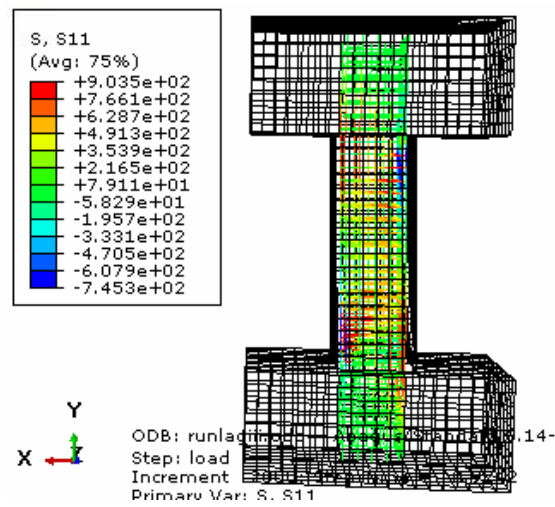
hasil eksperimental 55,8 mm. Pada pemodelan spesimen G33 step yang digunakan terdiri dari 3 step yaitu *initial*, *axial load* dan *lateral load*. Step *axial load* dan *lateral load* menggunakan *maximum number of increments* 15000 dengan ukuran *increment* initial 0,001, minimum 10^{-9} , dan maksimum 1. Hasil pemodelan yang ditunjukkan Gambar 4.31 didapatkan dengan ukuran *mesh* 100 mm. Pada proses running model kolom pracetak G33 muncul pesan *too many increments needed to complete the step* pada *displacement* 35 mm pada ABAQUS. Hal ini menunjukkan bahwa pada pemodelan tersebut iterasi dapat mencapai konvergen dan berhenti pada displacement 35 mm. Hasil output pemodelan kolom beton pracetak untuk spesimen G33 menunjukkan kolom tersebut mencapai puncak penerapan beban pada displacement 35 mm (drift 1,9%).



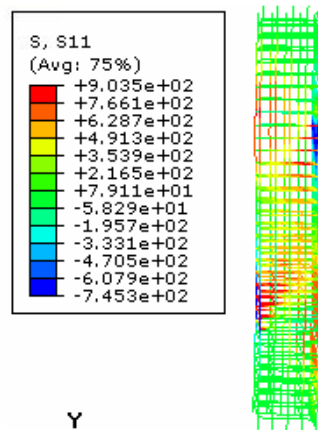
Gambar 4.31 Hasil output displacement yang terjadi pada spesimen G33

4.9. Tegangan Pada Sambungan

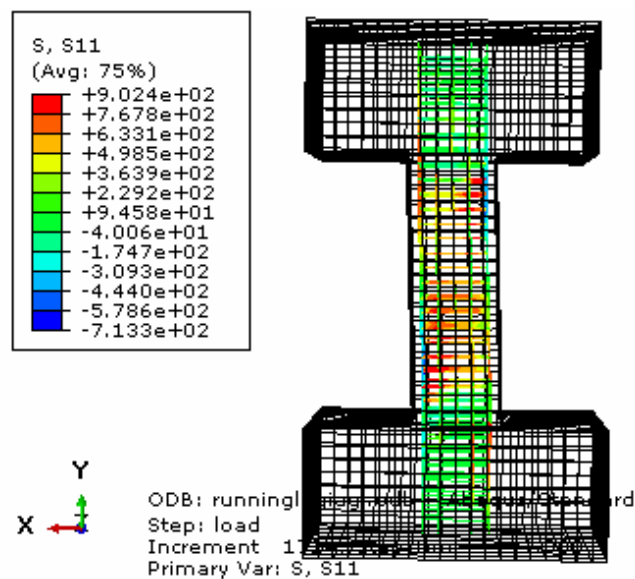
Pada kolom monolit tanpa sambungan grouted coupler tegangan besar dapat terjadi pada tulangan daerah sambungan. Namun pada kolom beton pracetak dengan sambungan grouted coupler tegangan yang sama diharapkan terjadi pada sambungan antara tulangan dengan coupler. Analisa dilakukan pada spesimen C10 dan G10.



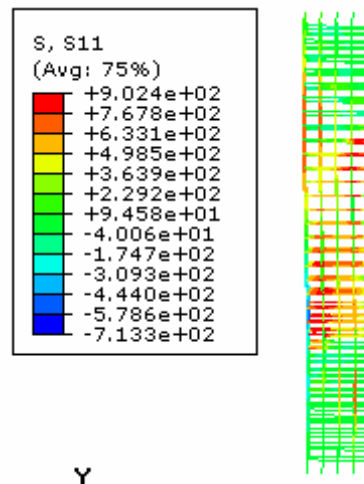
Gambar 4.32 Tegangan S11 tulangan pada spesimen C10



Gambar 4.33 Tegangan S11 tulangan pada spesimen C10



Gambar 4.34 Tegangan S11 tulangan pada spesimen G10



Gambar 4.35 Tegangan S11 tulangan pada spesimen G10

Gambar 4.32 dan Gambar 4.34 mengilustrasikan penyebaran tegangan di tulangan pada arah x pada kolom monolit terjadi pada sambungan kolom-blok beton sedangkan pada kolom pracetak terjadi pada daerah sambungan tulangan dengan coupler. Tulangan pada daerah sambungan kolom - blok beton pada kolom spesimen C10 menghasilkan tegangan sebesar 716 MPa sedangkan tulangan di sambungan coupler pada kolom pracetak spesimen G10 menghasilkan tegangan 725 MPa sehingga perbedaan tegangannya sebesar 1,4%. Hal ini menunjukkan kekakuan coupler yang lebih besar daripada kekakuan tulangan sehingga tegangan akan besar terjadi di daerah sambungan coupler dengan tulangan pada spesimen G10. Kedua spesimen tersebut sudah mengalami kelelahan pada tulangan dibuktikan dengan tegangan tulangan yang melebihi kuat leleh tulangan longitudinal.

4.10. Kurvatur Kolom

Kurvatur kolom didapatkan dari sudut yang terjadi pada kolom akibat perpindahan. Nilai kurvatur didapatkan dari rotasi setiap segmen pada kolom akibat perpindahan terhadap panjang penampang kolom. Dari rotasi setiap

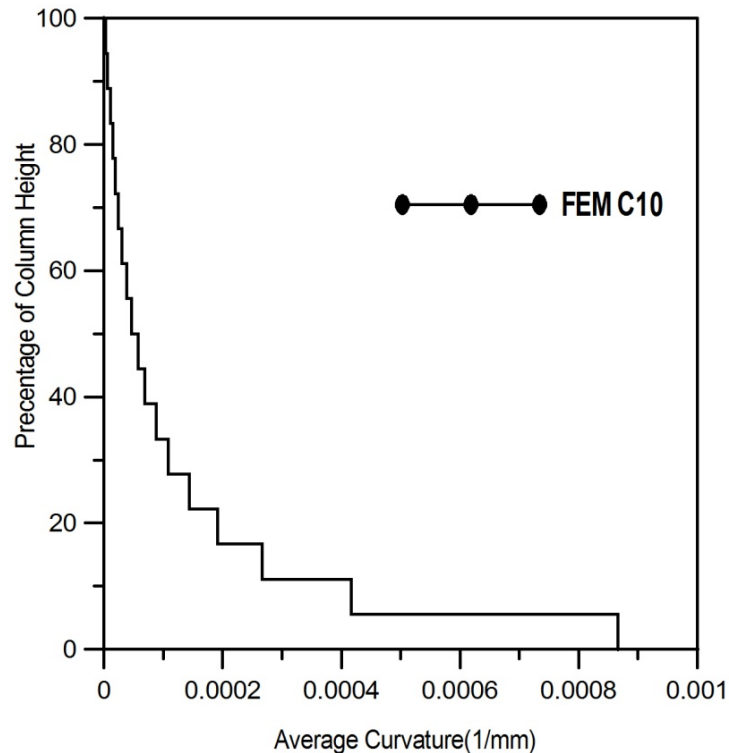
segmen dibagi dengan tinggi kolom didapatkan kemiringan gradien/kurvatur. Rotasi setiap segmen didapatkan dengan persamaan 4.1.

$$\theta = \frac{\Delta v_n - \Delta v_s}{b} \dots\dots\dots (4.1)$$

Setiap segmen diukur perpanjangan dan perpendekan vertikal, v_n dan v_s , pada segmen lebar penampang b . Rata-rata kurvatur didapatkan dari tinggi pada segmen, h , dengan persamaan 4.2.

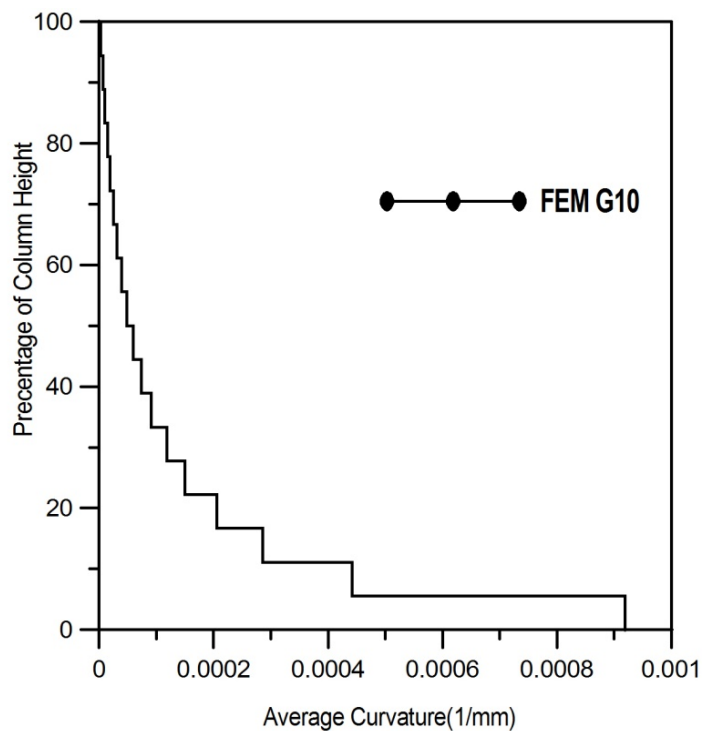
$$\phi = \frac{\theta}{h} \dots\dots\dots (4.2)$$

Pengukuran displacement menggunakan metode elemen hingga dapat dilakukan pada setiap node. Pengukuran dilakukan pada setiap tinggi mesh 100 mm pada sepanjang tinggi permukaan kolom untuk menentukan rata-rata kurvatur kolom. Tinggi kolom 1800 mm dengan luas penampang 600 mm x 600 mm. Kurvatur yang disajikan adalah single kurvatur. Gambar 4.36 menggambarkan rata-rata kurvatur setiap presentase 5,6% dari tinggi sepanjang kolom C10.

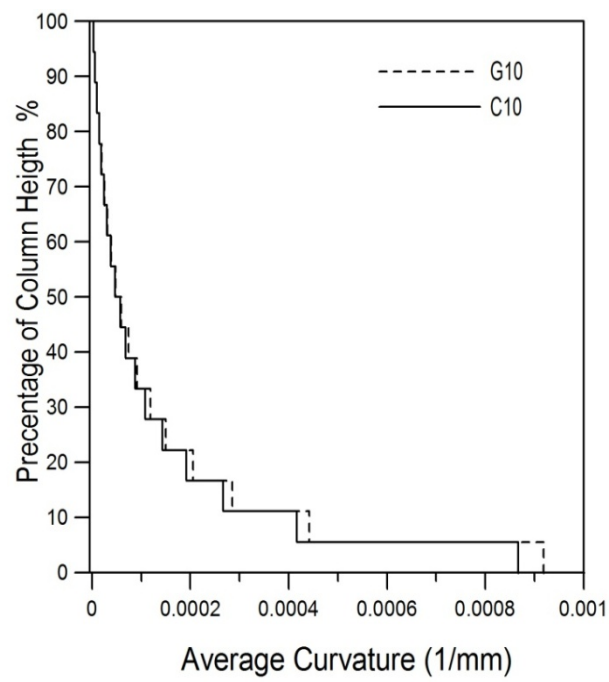


Gambar 4.36 Rata-rata kurvatur sepanjang kolom C10 metode full node

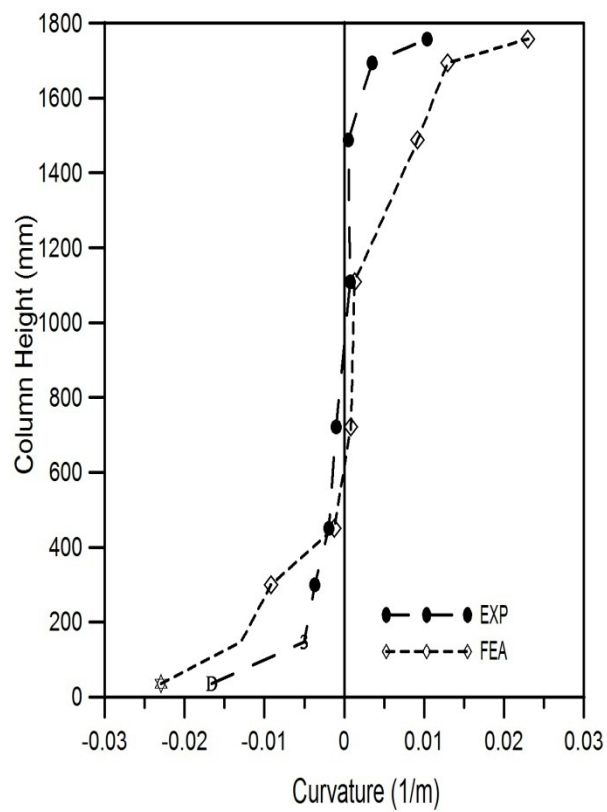
Gambar 4.37 menggambarkan rata-rata kurvatur setiap presentase 5,6% dari tinggi sepanjang kolom G10. Pengukuran displacement pada kolom pracetak G10 dilakukan setiap tinggi mesh 100 mm pada sepanjang tinggi permukaan kolom. Dari hasil kurva rata-rata kurvatur terhadap presentase tinggi kolom menunjukkan bahwa spesimen kolom monolit C10 dan kolom pracetak G10 mempunyai korelasi yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen kolom pracetak dengan sambungan *grouted sleeve coupler* mempunyai performa yang baik. Kurvature yang terjadi pada hasil pemodelan FEA kolom beton monolit mutu tinggi dan pracetak mutu tinggi terdapat perbedaan pada maksimum displacement yang dapat dihasilkan pada pemodelan FEA. Berdasarkan kurva perbandingan kurvatur ekuivalen terhadap presentase tinggi kolom antara kolom C10 dan G10 menunjukkan korelasi yang baik pada prediksi kedua spesimen.



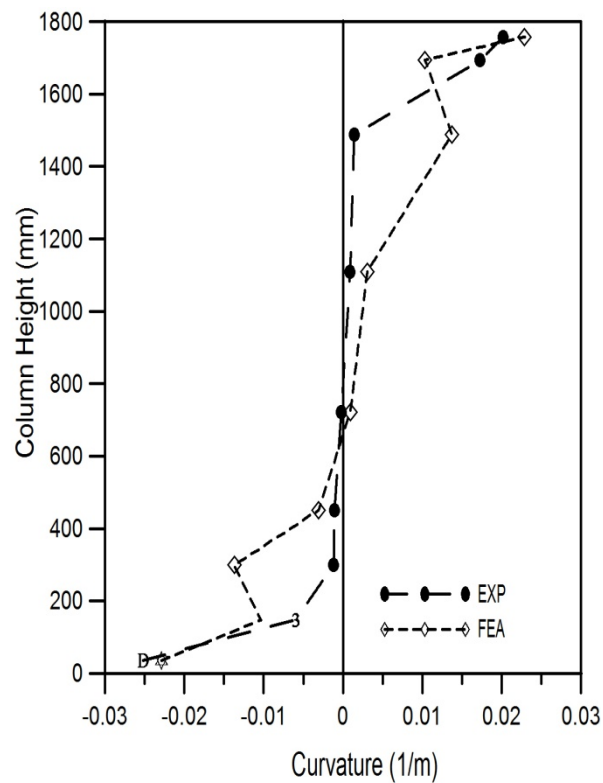
Gambar 4.37 Rata-rata kurvatur sepanjang kolom G10 metode full node



Gambar 4.38 Rata-rata kurvatur sepanjang kolom C10 vs G10 metode full node



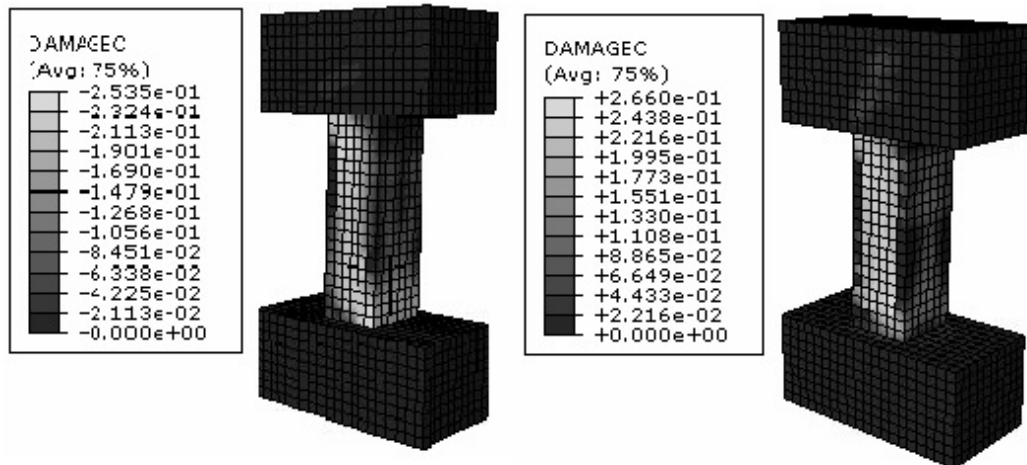
Gambar 4.39 Hasil korelasi kurvatur spesimen C10



Gambar 4.40 Hasil korelasi kurvatur spesimen G10

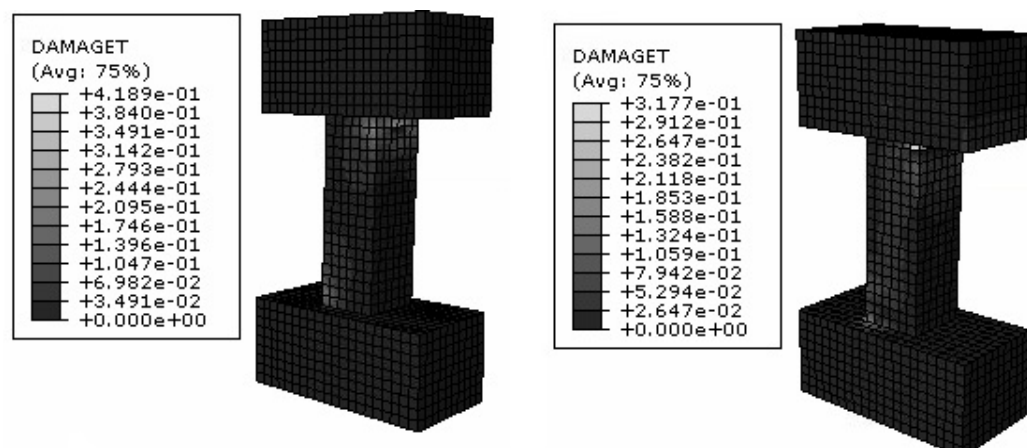
4.11. Perbandingan *Damage* Kolom Monolit dan Pracetak

Pemodelan kolom monolit dan pracetak dengan metode elemen hingga yang dibebani axial dan lateral menimbulkan kerusakan akibat tekan dan tarik seperti ditunjukkan pada Gambar 4.41 dan Gambar 4.42. Kerusakan tekan lebih terkonsentrasi pada badan kolom sedangkan kerusakan tarik terkonsentrasi pada sambungan kolom ke blok beton. Pola *deformed shape* kolom C10 dan G10 menunjukkan bahwa deformasi terjadi pada daerah sambungan kolom - blok beton dilihat dari kerusakan akibat tarik lebih besar pada sambungan kolom - blok beton. Regangan plastis pada spesimen C10 terjadi pada badan kolom dan sambungan kolom-blok beton namun pada spesimen G10 regangan plastis pada sambungan lebih kecil seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.43.

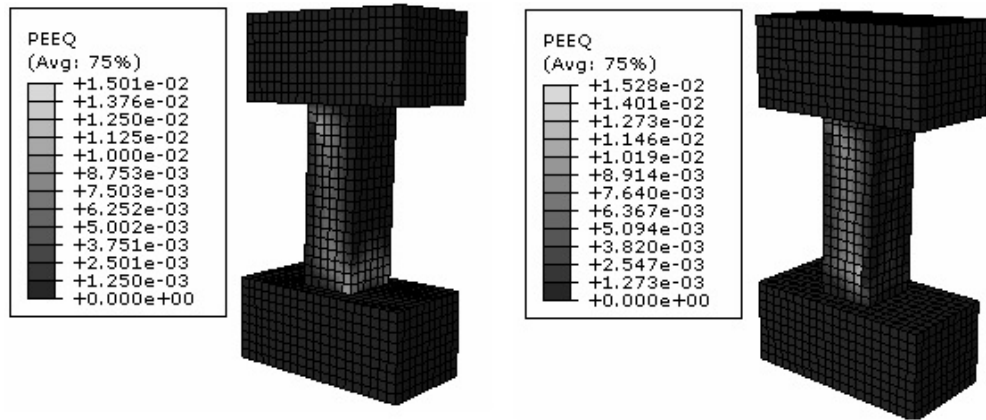


Gambar 4.41 Perbandingan kerusakan tekan pada kolom C10 dan G10

Berdasarkan perbandingan kerusakan kolom antara spesimen C10 dan G10, pada hasil eksperimental kerusakan retak terjadi pada daerah badan kolom karena beban aksial yang diterapkan dan daerah sambungan kolom dengan blok beton karena beban lateral. Hal ini juga terjadi pada hasil FEA menggunakan program ABAQUS, kerusakan yang terjadi akibat tekan terjadi pada badan kolom. Sementara kerusakan yang terjadi akibat tarik terjadi pada sambungan kolom dengan blok beton. Berdasarkan hasil eksperimental pada spesimen kolom G10 pola retak lebih banyak terjadi badan kolom. Hal tersebut juga terjadi pada hasil FEA menggunakan program ABAQUS ditunjukkan dengan adanya kerusakan akibat tekan dan regangan plastis pada kolom G10.



Gambar 4.42 Perbandingan kerusakan tekan pada kolom C10 dan G10



Gambar 4.43 Perbandingan regangan plastis pada kolom C10 dan G10

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil dan analisa yang dilakukan pada penelitian ini , maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan kurva *force - drift (%)* dapat disimpulkan bahwa pada eksperimental spesimen kolom beton monolit mempunyai korelasi yang baik dengan kolom beton pracetak. Hal ini juga terlihat pada hasil pemodelan dengan menggunakan software elemen hingga ABAQUS.
2. Berdasarkan kurva *force - drift (%)* hasil prediksi pemodelan kolom beton mutu tinggi dan kolom beton pracetak mutu tinggi dengan sambungan grouted sleeve coupler pada ABAQUS, menunjukkan perilaku kolom beton mutu tinggi dan kolom beton pracetak mutu tinggi mempunyai korelasi yang baik.
3. Dari kurva *force - drift (%)* antara hasil eksperimental spesimen kolom pracetak mutu tinggi dan hasil output ABAQUS kolom pracetak mutu tinggi menunjukkan prediksi FEA dengan korelasi yang baik sampai pada fase non linier (inelastic) pada drift 3,055%.
4. Dari hasil pemodelan ABAQUS, tegangan tulangan yang terjadi pada sambungan kolom dengan blok beton pada spesimen kolom beton mutu tinggi monolit sebesar 725 MPa mempunyai hasil yang mendekati dengan tegangan tulangan yang terjadi di sambungan *grouted sleeve coupler* terhadap tulangan longitudinal pada spesimen kolom beton pracetak mutu tinggi sebesar 716 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa perilaku kolom pracetak mutu tinggi mempunyai korelasi yang baik dengan kolom beton monolit mutu tinggi.

5.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan perlu adanya studi lebih lanjut pada penelitian kolom beton pracetak mutu tinggi. Adapun saran dalam penelitian ini untuk penelitian selanjutnya, diantaranya sebagai berikut :

1. Perlu adanya studi lebih lanjut mengenai pengaruh parameter viskositas dan sudut dilatasi CDP terhadap kurva *force-drift* pada pemodelan kolom beton

pracetak mutu tinggi dengan beban aksial dan lateral menggunakan program FEA ABAQUS.

2. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai efek kekakuan terhadap kurva *force-drift* pada pemodelan kolom dengan beban aksial dan lateral menggunakan program FEA ABAQUS.
3. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai pemodelan sambungan *grouted sleeve coupler* dan tulangan menggunakan elemen solid.
4. Perlu adanya studi lebih lanjut mengenai pengaruh pemodelan efek *bond slip* pada pemodelan *grouted coupler* dan beton bertulang menggunakan program ABAQUS.
5. Perlu adanya studi lebih lanjut mengenai perilaku softening pada kurva force-displacement pemodelan kolom beton bertulang maupun pracetak yang diprediksi oleh program FEA khususnya ABAQUS.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, R. Y., Nurhuda, I., Sukamta, and Fitriani, I. (2014). "Perilaku dan Kekuatan Sambungan Kolom pada Sistem Beton Pracetak." *Jurnal Ilmu dan Terapan Bidang Teknik Sipil*, 20(1).
- Alias, A., Zubir, M. A., Shahid, K. A., and Rahman, A. B. A. (2013). "Structural Performance of Grouted Sleeve Connectors With and Without Transverse Reinforcement For Precast Concrete Structure." *Procedia Engineering* 53 (2013) 116 – 123.
- Alrasyid, H. (2015). "Seismic Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns." Doctor of Philosophy, National Taiwan University of Science And Technology.
- Attard, M. M., and Setunge, S. (1996). "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete." *ACI Materials Journal*, 93(5), 432-441.
- Dhakal, R. P., and Maekawa, K. (2002). "Path-dependent cyclic stress–strain relationship of reinforcing bar including buckling." *Engineering Structures* 24, 1383–1396.
- Haber, Z. B., Saiidi, M. S., and Sanders, D. H. (2015). "Behavior and Simplified Modeling of Mechanical Reinforcing Bar Splices." *ACI Structural Journal*, 112(2), 179-188.
- Hsu, T. T. C., and Zhang, L.-X. (1996). "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membrane Elements." *ACI Structural Journal*, 93(1), 108-115.
- Imran, I., Eddy, L., Mujiono, and Fadilla, E. "STUDI EKSPERIMENTAL SAMBUNGAN KOLOM-KOLOM PADA SISTEM BETON PRACETAK DENGAN MENGGUNAKAN SLEEVES." *Proc., Seminar dan Pameran HAKI*.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Onate, E. (1989). "A PLASTIC-DAMAGE MODEL FOR CONCRETE." *J. Solids Structures* 25(3), 299-326.
- Mander, J. B. (1983). "Seismic Design of Bridge Piers." Doctor of Philosophy, University of Canterbury.
- Ou, Y.-C., Alrasyid, H., Haber, Z. B., and Lee, H.-J. (2015). "Cyclic Behavior of Precast High-Strength Reinforced Concrete Columns." *ACI Structural Journal*, 112(6), 839-850.
- Ou, Y.-C., and Kurniawan, D. P. (2015). "Effect of Axial Compression on Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns." *ACI Structural Journal*, 112(2), 209-220.

- Ou, Y.-C., and Kurniawan, D. P. (2015). "Shear Behavior of Reinforced Concrete Columns with High-Strength Steel and Concrete." *ACI Structural Journal*, 112 (1), 35-45.
- Piscesa, B., Attard, M. M., Samani, A. K., and Suprobo, P. "Numerical Investigation on The Behavior of Concrete-Filled-Steel-Tube Column under Eccentric Loading." *Proc., Regional Conference in Civil Engineering (RCCE) The Third International Conference on Civil Engineering Research (ICCER)*, 1-6.
- Razvi, S., and Saatcioglu, M. (1999). "CONFINEMENT MODEL FOR HIGH-STRENGTH CONCRETE." *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, 281-289.
- Rodriguez, M. E., Botero, J. C., and Villa, J. (1999). "CYCLIC STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF REINFORCING STEEL INCLUDING EFFECT OF BUCKLING." *Journal of Structural Engineering*, 125(6).
- Safi, F. (2017). "KAJIAN PERILAKU GESER KOLOM BETON BERTULANG MUTU TINGGI MENGGUNAKAN METODE FINITE ELEMENT." Master Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya.
- Sgambi, L., Zambelli, S., Pagani, C., and Bontempi, F. "Experimental and Numerical Assessment of a Special Joint Connection for Precast Columns." *Proc., The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'11+)*.
- Simulia, D. S. (2010). "Analysis User's Manual."
- Simulia, D. S. 2014. ABAQUS.
- Tirtajaya, R., Tavio, Suprpto, K., and Subakti, A. "Design of Precast Concrete Column for Earthquake Resistant and Fast-Build House with Infill Frame System." *Proc., Proceedings of National Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (1st APTECS), Surabaya*.
- Tullini, N., and Minghini, F. (2016). "Grouted sleeve connections used in precast reinforced concrete construction – Experimental investigation of a column-to-column joint." *Engineering Structures*, 127, 784–803.
- Wibowo, L. S. B., Tavio, Soegihardjo, H., Wahyuni, E., and Iranata, D. "STUDI PERILAKU SAMBUNGAN BALOK PRACETAK UNTUK RUMAH SEDERHANA TAHAN GEMPA AKIBAT BEBAN STATIK." *Proc., Seminar Nasional VII 2011 Teknik Sipil ITS Surabaya* A87-A94.
- Yan, Q., Chen, T., and Xie, Z. (2018). "Seismic experimental study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves." *Engineering Structures*, 155 (2018) 330–344.

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Ali Rofiq, dilahirkan di Boyolali, 6 Maret 1993, merupakan anak Ketiga dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TKN Cepogo 1 Boyolali, SDN Cepogo 1 Boyolali, SMP AL-SLAM 1 Surakarta, SMA AL-SLAM 1 Surakarta. Setelah lulus dari SMA AL-SLAM 1 Surakarta tahun 2011, Penulis mengikuti tes masuk program D3 Teknik Sipil yang diselenggarakan oleh FT – UNS Surakarta dan diterima pada Jurusan D3 Teknik Sipil dan terdaftar dengan NRP 3108030151. Pada jurusan D3 Teknik Sipil ini penulis mengambil bidang studi bangunan gedung FT – UNS dan lulus pada tahun 2015. Tahun 2016 penulis melanjutkan program lanjut jenjang D4 Teknik Sipil FTSP – ITS Surabaya dan terdaftar dengan NRP 3111040607. Pada jurusan D4 Teknik Sipil ini Penulis mengambil bidang studi bangunan gedung FTSP – ITS dan lulus tahun 2017. Tahun 2017 penulis mengikuti tes masuk program Pascasarjana Teknik Sipil dan diterima pada bidang Teknik Sipil Rekayasa Struktur FTSLK – ITS. Pengalaman kerja penulis pernah bekerja sebagai Staff Teknik CV. Ambangun Negoro Sugih (2015-2016). Penulis hingga saat ini masih aktif sebagai praktisi perencanaan struktur di beberapa proyek Swasta. Email- rofiq.raharja@gmail.com Cp ; 081336121723